



Bachelorarbeit

Forensische Untersuchung eines Schädelfundes aus der
Völkerwanderungszeit

Alexandra Conradi

Studiengang: Allgemeine und Digitale Forensik

Seminargruppe: FO14w2-B

Erstprüfer: Prof. Dr. Christian Hummert

Zweitprüfer: Marie-Luise Heuschkel M.Sc.

Einreichung: 18.09.2017

Verteidigung: Mittweida, 2017

Danksagung

Ich möchte der Stadt Köthen für ihre Zusammenarbeit mit der Hochschule und für die Bereitstellung des Originalschädels danken, ohne die dieses Projekt nicht zustande gekommen wäre.

Ich danke auch Professor Dr. Frank Hahn (Fakultät Ingenieurwissenschaften) für seine fachliche Beratung und Hilfe bei der Durchführung der Belastungstests.

Außerdem möchte ich mich bei meinen Betreuern Professor Dr. Christian Hummert und Frau Marie-Luise Heuschkel M.Sc. für ihre umfangreiche Unterstützung bedanken, sowie bei allen anderen aktiv oder passiv am Projekt Beteiligten für ihre Geduld während der aufwändigen Vorbereitungen.

Zusammenfassung und Abstract

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung einer Schädelfraktur in einem archäologischen Fund. Es werden Hypothesen über die Ursache diskutiert und in Teilen experimentell überprüft.

Aufgrund von zeitlichen Einschränkungen und fehlenden Materialien wurde eine andere Hypothese getestet, als ursprünglich vorgesehen:

Es wurde versucht, die Krafteinwirkung eines Grabungswerkzeuges auf einen archäologischen Schädel durch Versuche mit künstlich "gealterten" Schweineschädeln nachzustellen.

Da nur eine kleine Testgruppe an Schädeln zur Verfügung stand und keine originalen Werkzeuge verwendet wurden, konnten die Versuche die Hypothese nicht eindeutig belegen oder widerlegen.

Die in dieser Arbeit angestellten Überlegungen und Erfahrungen können aber als Grundlage für weiterführende Arbeiten dienen.

The thesis at hand is concerned with the investigation of a skull fracture present in an archaeological find. Hypothesis about the potential cause are being be discussed and (in part) experimentally verified.

Because of time limits and unavailable materials a different hypothesis than the originally scheduled one has been tested:

It was attempted to replicate the force effect of an excavation tool on an archaeological skull using artificially "aged" pig skulls.

Due to the very small group of testing samples and the lack of original tools, the hypothesis could be neither verified nor rejected.

However, the considerations and experiences gained through this work can be used as a basis for further experiments.

Inhalt

1	Einleitung	6
2	Grundlagen	8
2.1	Pfeil und Bogen	8
2.1.1	Aufbau und Funktionsweise von Pfeil und Bogen	8
2.1.2	Physikalische Betrachtung des Bogenschusses	16
2.2	Eigenschaften des menschlichen Schädels	20
2.2.1	Mechanische Eigenschaften des menschlichen Schädelknochens	21
2.2.2	Interpretation von Schädelfrakturen	24
2.2.3	Besondere Eigenschaften archäologischer Knochen	25
2.2.4	Eigenschaften von Ersatzmaterialien für Belastungstests	26
2.3	Betrachtung der archäologischen Funde	27
2.3.1	Eigenschaften des Schädels aus Grab 61	27
2.3.2	Eigenschaften der Pfeilspitze aus Grab 61	29
3	Methodik	32
3.1	Belastungstest	32
3.1.1	Einschränkungen	32
3.1.2	Vorbereitung	33
3.1.3	Durchführung	34
3.2	Testergebnisse	35
4	Diskussion	41
4.1	Interpretation und Vergleich der Ergebnisse	41
4.2	Fazit und Ausblick	45
A	Anhang	47

Abbildungsverzeichnis	61
Literatur	61
B Eigenständigkeitserklärung	I

Einleitung

Bei einer Ausgrabung in Görzig (Sachsen-Anhalt) wurden 1958 die Gräber einer Massenbestattung aus dem 5. Jahrhundert n.Chr. ausgehoben. Darunter ein Schädel, der aufgrund einer Bruchstelle fast 60 Jahre später neue Aufmerksamkeit erlangt: Die Todesursache wird in einer lochförmigen Fraktur im linken Bereich des linken Scheitelbeins vermutet; eine im gleichen Grab gefundene Pfeilspitze könnte die Tatwaffe gewesen sein.[Huck 2007], [Kleinecke 2011]

Der genaue Zusammenhang zwischen der im Grab aufgefundenen Pfeilspitze und der Schädelfraktur des Skelettes ist jedoch bis heute spekulativ.

Das besondere Interesse an dem Skelettfund aus Grab 61 liegt nicht nur in dem seltenen Umstand begründet, dass die vermeintliche Tatwaffe am Bestattungsort gefunden wurde, sondern auch darin, dass sich dieses Grab (und einige weitere in der Umgebung) durch Elemente reiter-nomadischer Kulturen auszeichnen. Typisch hunnische Kulturelemente wie beigelegte Bewaffnungen steppen-nomadischen Typs oder im östlichen Stil künstlich deformierte Schädel belegen den engen Kontakt der einheimischen Germanengruppen mit Menschen aus dem mongolischen Raum zur Zeit der Völkerwanderung. [Huck 2007]

Daher ist es naheliegend, auch in der im Grab gefundenen Pfeilspitze einen potentiell hunnischen Ursprung zu vermuten. Jedoch ist diese Hypothese aufgrund morphologischer und materieller Unstimmigkeiten nicht gesichert. Daher wird sich diese Arbeit auch mit dem potentiellen Ursprung der Pfeilspitze befassen. Als Ansatz dafür dient die äußere Form der Spitze: es handelt sich um eine 4,43cm lange zwei-flüglige Pfeilspitze aus gegossener Bronze, die mittels Tülle am Schaft befestigt wurde. Spitzen eines ähnlichen Typs sind bereits aus anderen Regionen seit der mittleren Bronzezeit bekannt (vergleiche Abbildung 33). [Kleinecke 2011], [Schmidt 1961], [Říhový 1996]

Ein anderer Erklärungsansatz zum Ursprung der Fraktur könnte jedoch auch Unacht-

samkeit zum Zeitpunkt der Ausgrabungen sein. Durch die lange Zeit im feuchten Erdboden ist es möglich, dass der Knochen weich und porös wurde und während der Grabungsarbeiten eine Grabungsnadel oder ein ähnliches Werkzeug den Bruch verursachte. Diese Hypothese soll ebenfalls diskutiert werden.

Um zu einer Einschätzung über die Plausibilität beider Hypothesen zu kommen, sollen mechanische Belastungstests an Schädel-Ersatzmaterialien durchgeführt werden. Mit Hilfe von Repliken der Originalspitze und ausgewählten Grabungswerkzeugen soll festgestellt werden, welche Art von Verletzung diese in einem Schädelknochen hinterlassen würden. Dabei darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die Art des Bogens, von dem ein Pfeil abgeschossen wird, direkten Einfluss auf die Auswirkung des Einschlags hat. Basierend auf den Ergebnissen der Experimentalreihe sollen daher auch Überlegungen zu dem möglicherweise benutzten Bogen angestellt und diese Ergebnisse im Anschluss experimentell überprüft werden.

Im Verlaufe der Arbeit wird daher angestrebt, verschiedene klassische und moderne forensische Methoden zur Untersuchung der ungeklärten Schädelfraktur anzuwenden. Ziel ist es, neben der Überprüfung der Hypothesen, aufzuzeigen, wie die Methodiken der Forensik in verschiedenen wissenschaftlichen Gebieten Anwendung finden können.

Grundlagen

2.1 Pfeil und Bogen

2.1.1 Aufbau und Funktionsweise von Pfeil und Bogen

Pfeil und Bogen zählen zu den ältesten Waffen der Menschheit. Ihre Effektivität beruht auf dem komplexen Zusammenspiel der einzelnen Komponenten. Dabei wird auch bei modernen Jagd- und Sportbögen das gleiche Prinzip der Kraftübertragung angewandt, wie bei primitiven Bögen der Völkerwanderungszeit. Um die Funktion des gesamten Systems zu verstehen, müssen zunächst die Komponenten im Einzelnen betrachtet werden (siehe dazu Abbildung 1):

Der Pfeil

Die Länge des Schaftes wird vom Nockenboden (Abbildung 2) bis zum Ende des Schaftes

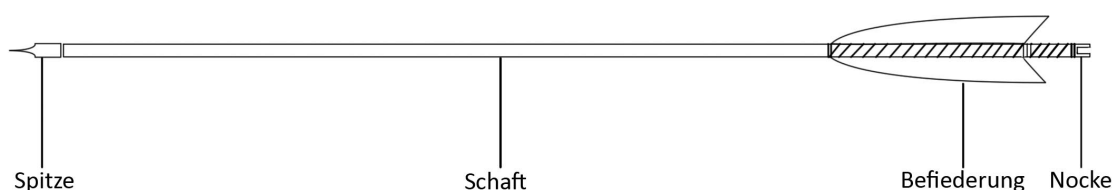


Abbildung 1: Vollständiger Pfeil; eigene Grafik

gemessen. Verschiedene Schäfte variieren in Durchmesser, Länge, Gewicht und Biegsamkeit. Diese Eigenschaften haben großen Einfluss auf das Flugverhalten und die Aufschlagswirkung des Pfeils. So bedeutet ein größerer Schaftdurchmesser (bei gleichem Material) ein höheres Pfeilgewicht und damit mehr Momentum beim Auftreffen auf das Ziel (genauer dazu auf Seite 19). Leichtere und dünnere Schäfte dagegen erreichen höhere Geschwindigkeiten und größere Reichweiten.

Die Nocke ist der Teil des Schafts, der die optimale Kraftübertragung von der Sehne auf

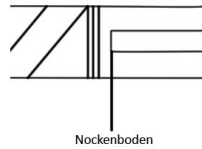


Abbildung 2: Nocke; eigene Grafik

den Pfeil gewährleistet. Sie dient dazu, den Pfeil während des gesamten Schussvorgangs an einer Position an der Sehne zu fixieren. Sie wird traditionell in den hinteren Teil des Schaftes geschnitten. Der Einschnitt erfolgt quer zur Maserung des Schaftes, um ein Aufsplittern zu verhindern. Moderne Nocken bestehen aus Kunststoff und werden auf den Schaft aufgeklebt oder in ein "Insert" eingeschraubt bzw. eingeklebt. [Berg 2017]

Die Spitze am vorderen Ende des Schaftes dient dazu, den durch das Auftreffen auf das Ziel übertragenen Impuls effektiver zu nutzen und maximalen Schaden zu verursachen. Sie wird traditionell aus Stein, Knochen oder Metall gefertigt und entweder in den Schaft eingelassen oder mit einer Tülle aufgesteckt. Die Form der Spitze ist abhängig von ihrem Verwendungszweck: Spitzen zur Jagd sind breit gefächert, um möglichst viel Schaden im Gewebe des Ziels zu verursachen; Sogenannte Bodkin-Spitzen sind nadelförmig ohne Widerhaken und dienen dazu, Panzerung zu durchschlagen und die Eindringtiefe des Pfeils zu erhöhen. Formen und Material der Spitze variieren außerdem in verschiedenen Kulturkreisen und ermöglichen so die zeitliche und geografische Einordnung eines Spitzenfundes.

Die Befiederung sitzt am oberen Ende des Schaftes und besteht meistens aus drei oder vier Federn. Ihr Zweck ist die Stabilisierung des Pfeils im Flug, indem sich die vorbeiströmende Luft in der natürlichen Krümmung der Federn fängt und den Pfeil in Rotation versetzt. Eine Befiederung mit größeren Federn bietet mehr Luftwiderstand, wodurch der Pfeil schneller stabilisiert, jedoch auch stärker ausgebremst wird. Eine kleine Befiederung bedeutet im Gegenteil dazu weniger Luftwiderstand und größere Reichweite, jedoch einen instabilen Flug auf kurzen Distanzen. [Meyer 2015]

Der Spine

Die Biegsamkeit des Schaftes ist ausschlaggebend für das Flugverhalten des Pfeils und die Genauigkeit des Schusses. Diese Biegsamkeit wird mit dem Spine bzw. dem Spinewert beschrieben. Er beschreibt die Durchbiegung eines Schaftes von 28" Länge, an dessen Mitte ein Gewicht von 1.94lbs gehängt wird. (statischer Spine). Ein hoher Spinewert beschreibt einen steiferen Pfeil, ein niedriger Spinewert einen weichen. Der Spine eines

Pfeils sollte auf den Bogen abgestimmt sein, von dem er geworfen wird. Dazu müssen viele Faktoren wie Bogendesign, Zuggewicht, Sehnenmaterial und Spitzengewicht berücksichtigt werden. Diese beeinflussen den dynamischen Spine, d.h. die Durchbiegung im Pfeilflug. Ein falsch abgestimmter Spinewert macht sich dadurch bemerkbar, dass der Pfeil "schief" im Ziel steckt. Genauer: ein zu steifer Pfeil wird (geschossen von einem Rechtshand-Schützen) nach rechts geneigt sein, ein zu weicher Pfeil nach links. Ursächlich dafür ist die Oszillation des Pfeils im Flug (genauer dazu auf Seite 16 "Pradoxon des Bogenschießens"). Besonders im modernen Bogensport wird äußerst genau auf den richtigen Spinewert geachtet. [Huelsing 2014]

Der Bogen

In seiner einfachsten Form besteht ein Bogen aus zwei biegsamen Wurfarmen, die durch ein steifes Mittelstück miteinander verbunden sind und zwischen denen eine Sehne gespannt ist. An den äußeren Enden des Bogens befinden sich die sog. Tips; Kerben in die die Sehne eingehangen wird. Die Wurfarme sind der biegsame Teil des Bogens und traditionell aus Holz gefertigt. Sie werden durch das Aufspannen der Sehne zwischen den Tips auf Vorspannung gebracht. Durch Zug an der Sehne werden die Wurfarme aus dieser Position (der Standhöhe) ausgelenkt und die für die Beschleunigung eines Pfeils nötige Energie aufgebaut.

Verbunden sind die Wurfarme durch ein unbiegsames Griffstück. Bei den meisten traditionellen Bogenformen sind dieses und die Wurfarme aus einem Stück Holz gefertigt. Bei einigen Formen, wie dem Kompositbogen, sind Mittelstück und Wurfarme separate Teile. Die Sehne, welche die Wurfarme an den äußeren Enden verbindet, wird für moderne Sportbögen aus Kunststoff gefertigt. Historische Sehnen bestehen dagegen aus Tiersehnen oder Pflanzenfasern (zum Beispiel Hanf). Die Sehne ist kürzer als die Gesamtlänge des Bogens. Ihre Länge bestimmt die Standhöhe des aufgespannten Bogens (siehe Abbildung 3).

Traditionelle oder "Primitiv-" Bögen werden verwendet, indem der Pfeil auf der den Bogen haltenden Hand des Schützen aufgelegt wird. Modernere Bogenformen verfügen oft über eine Pfeilauflage, meistens in Verbindung mit einem Bogenfenster. Dabei wird eine Einkerbung im 90-Grad-Winkel in das Griffstück geschnitten. Der Pfeil liegt dadurch nicht mehr auf der Hand des Schützen auf, wodurch sich wiederum der Spinewert verändert.

[Kooi 1983], [Meyer 2015]

Der Nockpunkt ist der Punkt, an dem der Pfeil an der Sehne eingehängt wird. Er kann

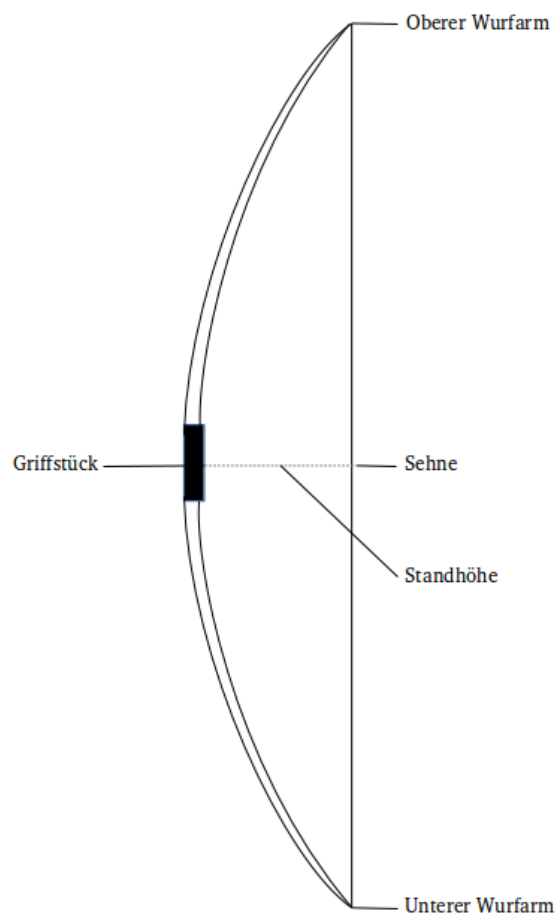


Abbildung 3: Schema eines einfachen Langbogens; eigene Grafik

durch einen kleinen Metallring oder Umwicklung mit Schnur markiert werden. Der Nockpunkt hilft nicht nur dabei, die Schussbedingungen für jeden Pfeil möglichst gleich zu gestalten, sondern hat auch Einfluss auf das Verhalten des Pfeils im Flug. Ein zu hoch oder zu tief eingennockter Pfeil "reitet" in der Luft, das heißt, er führt eine Auf- und Ab-Bewegung entlang der X-Achse eines karthesischen Koordinatensystems aus. Grund dafür ist, dass der Pfeil bei falsch gesetztem Nockpunkt bei Abschuss an der Hand des Schützen (bzw. an der Pfeilaufgabe) anschlägt. [Kooi 1983]

Durch verschiedene Modifikationen, zum Beispiel in der Form der Wurfarme oder der Wahl der Materialien für Bogen und Sehne, kann dieses einfache Grunddesign optimiert werden. Jede Kultur, die das Bogenschießen praktizierte, entwickelte dafür im Laufe der Zeit eigene Strategien. Auf die Besonderheiten der Bogenarten aus östlichen bzw. reiternomadischen Kulturen soll im Punkt "Hunnischer Bogenbau" näher eingegangen werden. In den Abbildungen 4 und 5 sind verschiedene Bogendesigns dargestellt.

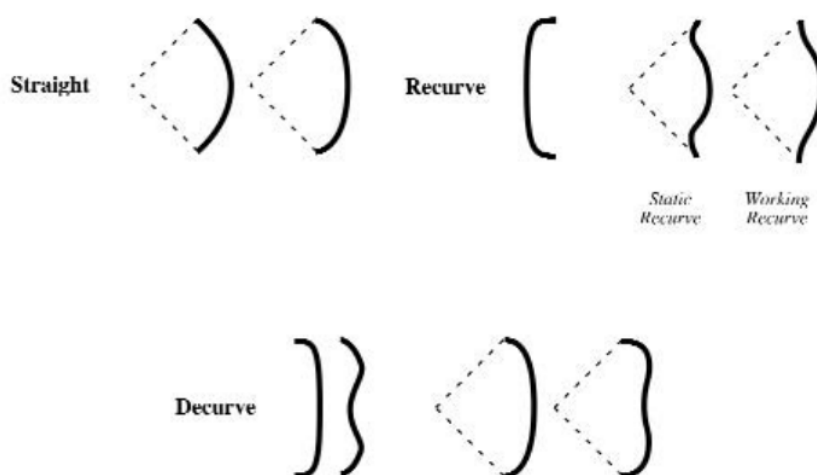


Abbildung 4: verschiedene Bogendesigns; aus [Grayson et al. 2007]

Hunnischer Bogenbau

Obwohl die Begriffe "Hunnenbogen" und "Mongolenbogen" oft synonym verwendet werden, sind die Gruppen der Hunnen und Mongolen im historischen Kontext nicht identisch. Von den "Hunnen" ist ca. seit 375 n.chr. die Rede. Das Hunnenreich umfasste zur Zeit der Völkerwanderung und der Entstehung der Görzig-Grabstätte (5.Jh.) viele verschiedene Ethnien und Kulturkreise zwischen den Flüssen Wolga und Rhein, darunter auch die Gebiete der heutigen Mongolei. Auch gehörten gerade in Mitteleuropa viele Germanen zur

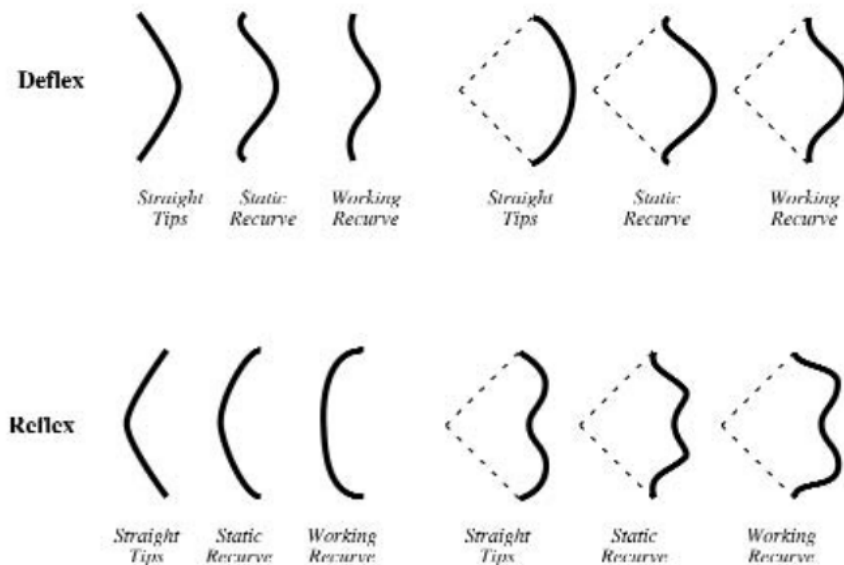


Abbildung 5: verschiedene Bogendesigns; aus [Grayson et al. 2007]

Führungsebene des Hunnenreiches. Bestimmte prägende kulturelle Eigenschaften jedoch, wie die nomadische Lebensweise, sind östlichen Ursprungs. Dazu gehört auch die besondere Art des Bogenbaus. [Altheim et al. 1958]

Der sogenannte Kompositbogen ist die typische hunnische Bogenbauweise. Dabei wird der Bogen nicht aus einem einzigen Stück Holz gefertigt, sondern aus verschiedenen Materialien zusammengesetzt. Oft sind auch Wurfarme und Griffstück von einander getrennt und werden zur Benutzung des Bogens zusammengesetzt und mit Umwicklungen fixiert. Hochwertige Bogenhölzer, wie Eibe, standen den Steppenvölkern selten zur Verfügung, daher mussten die nötigen mechanischen Eigenschaften eines Bogens mit Hilfe anderer Materialien hergestellt werden. Verbunden wurden die Materialien mit Leim aus Tierhäuten.

Der Kern der Wurfarme und des Griffstücks besteht aus Holz. Darauf aufgeleimt werden verschiedene Materialien, die die Wurffleistung und die Haltbarkeit des Bogens steigern sollen. Meist kommen dazu flache Knochenstreifen oder Horn, Sehnen und Baumrinden zum Einsatz. Hornbeläge auf dem Bogenbauch widerstehen den stauchenden Kräften beim Biegen besser als reines Holz, während Sehnenbeläge auf dem Bogenrücken mehr Widerstand gegen die ziehenden Kräfte bieten. An den Enden der Wurfarme befinden sich steife Verlängerungen, sogenannte Siyah, in die die Sehne eingehängt bzw. festgebunden wird (Abbildung 6). Lange Siyah erhöhen die Beschleunigung der Sehne und die Geschwindigkeit, mit der der Pfeil den Bogen verlässt. Da diese Bögen dazu geeignet sein

sollten, vom Pferderücken aus geschossen zu werden, waren sie nicht nur relativ kurz (ca. 110-130cm im aufgespannten Zustand), sondern auch oft in asymmetrischer Weise gebaut, mit einem kürzeren unteren Wurfarm (Abbildung 7) [Boña 1991].

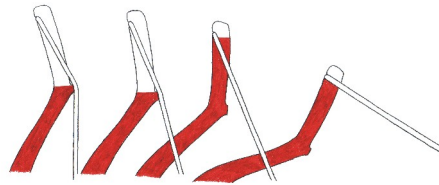


Abbildung 6: Siyahs während des Ziehens; [Wikimedia-Commons 2006]

Germanischer Bogenbau

Zur Zeit der Entstehung des görziger Gräberfeldes war in West-und Mitteleuropa fast ausschließlich der Langbogen verbreitet. In Osteuropa findet sich ein als Alemannen-Bogen bekannter Flachbogen-Typ und in Nordeuropa existierte der sogenannte Lappische Kompositbogen, der im Design den östlichen Kompositbögen ähnelte.[Junkmanns 2013]

Der Begriff "Langbogen" beschreibt einen Bogen aus einem Stück Holz mit D-förmigem Querschnitt. Er ist in der Regel etwas länger als der Schütze, gerade und besitzt kein abgesetztes Griffteil. Manche Langbogentypen besaßen mit Horn verstärkte Bogenenden. Das bevorzugte Bogenholz dieser Zeit war Eibe. Die verschiedenen Holzschichten (Splintholz und Kernholz) besitzen die richtigen Eigenschaften, um den hohen mechanischen Belastungen, die beim Biegen eines Bogens im D-Querschnitt entstehen, zu widerstehen. Das hellere, äußere Splintholz bildet dabei den geraden Bogenrücken, auf den ziehende Kräfte wirken; das dunkle, innere Kernholz bildet den runden Bogenbauch, an dem das Holz stark gestaucht wird. Hornnocken dienten dazu, ein Aufspalten des Holzes durch die Sehnenkerben zu verhindern und sollten auch das Aufspannen des Bogens erleichtern. [Junkmanns 2013]

Technik

Im Laufe der langen Geschichte des Bogenschießens wurden verschiedene Techniken entwickelt, Pfeil und Sehne aus den Fingern zu lösen. Dabei haben sich vor allem zwei Techniken durchgesetzt: der mediterrane Griff und die Daumentchnik.



Abbildung 7: traditioneller asymmetrischer Reiterbogen; [reiterbogenshop.com 2017]

Der mediterrane Griff bzw. Stil ist in ganz Europa verbreitet und bereits seit der griechischen Antike belegt. [Bakas 2014]

Morse beschreibt diese Griffart als älteste bekannte Griffart in den "nördlichen mediterranen Regionen [...] und südlichen mediterranen Regionen". [Morse 1885]. Beim mediterranen Griff greifen Zeige-, Mittel-, und Ringfinger die Sehne am Nockpunkt. Der Zeigefinger liegt über dem eingnockten Pfeil, die anderen Finger darunter. Der Pfeil wird auf dem Handrücken der den Bogen greifenden Hand aufgelegt. (siehe "Mediterranean Release" Abbildung 8)

Dem gegenüber steht die Daumentchnik, auch mongolischer Stil genannt. Dabei wird die Sehne am Nockpunkt mit dem Daumen gegriffen. Beim Lösen (mit der rechten Hand) wird die Sehne, anders als beim mediterranen Griff, nach rechts ausgelenkt (genauerer dazu auf Seite 16). Dadurch wird der Pfeil zuerst von der Sehnenhand weggebogen. Dementsprechend wird der Pfeil auf dem Daumen der den Bogen greifenden Hand aufgelegt. ("Mongolian Release" Abbildung 8)

Die Daumentchnik ist besonders bei berittenen Bogenschützen verbreitet, da sie ein sehr schnelles und unkompliziertes Einnocken des Pfeiles und Greifen der Sehne ermöglicht. Optimalerweise geschieht dies in einer einzigen, durchgängigen Bewegung.

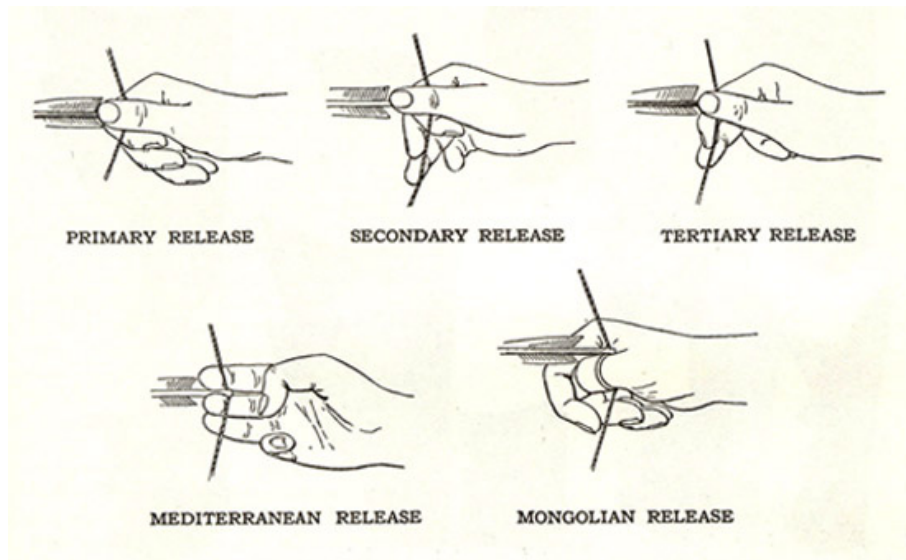


Abbildung 8: verschiedene Griffarten nach Morse; [Morse 1885]

2.1.2 Physikalische Betrachtung des Bogenschusses

Das Paradoxon des Bogenschießens

Das sogenannte Paradoxon des Bogenschießens beschreibt ein physikalisches Phänomen, das elementar für das Zusammenspiel von Pfeil und Bogen ist. In Abbildung 2.1.2 ist dargestellt, wie ein Pfeil im mediterranen Stil, rechtshändig im eingekockten und ausgezogenen Zustand am Bogen positioniert ist. Für Linkshandschützen verhält sich die Positionierung genau spiegelverkehrt. Die Spitze des Pfeils zeigt vom Median zwischen Sehne, Bogen und Ziel weg. Augenscheinlich würde ein so geschossener Pfeil sein Ziel verfehlen. [Bow-International 2013], [Kooi 1983]

Abbildung 2.1.2 a) stellt den Moment des Lösens der Sehne dar. Durch die von der rechten Seite fassenden Finger wird die Sehne nicht gerade, sondern mit einer leichten Bewegung nach links gelöst. Dadurch wird auch die Nocke in Richtung der Sehne bewegt und der Pfeil gebogen.

Anschließend bewegt sich die Sehne zurück nach rechts in ihre Ausgangsposition, wobei wiederum der Pfeil in entgegen gesetzte Richtung gekrümmt und somit in Oszillation versetzt wird.

Währenddessen führen Sehne und Pfeil eine Vorwärtsbewegung aus (siehe Abbildung 2.1.2 b).

Wenn die Sehne ihre ursprüngliche Standhöhe erreicht hat, löst sich die Nocke von der Sehne. Der Pfeil wird dabei weiter vorwärts beschleunigt und behält die durch die Bewe-

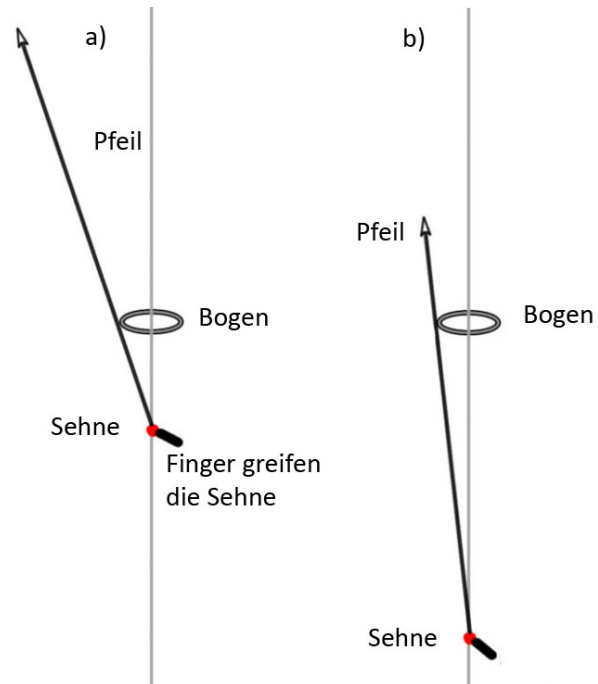


Abbildung 9: a) Pfeil eingnockt und Sehne auf Standhöhe. b) Pfeil eingnockt und Sehne ausgezogen; eigene Grafik

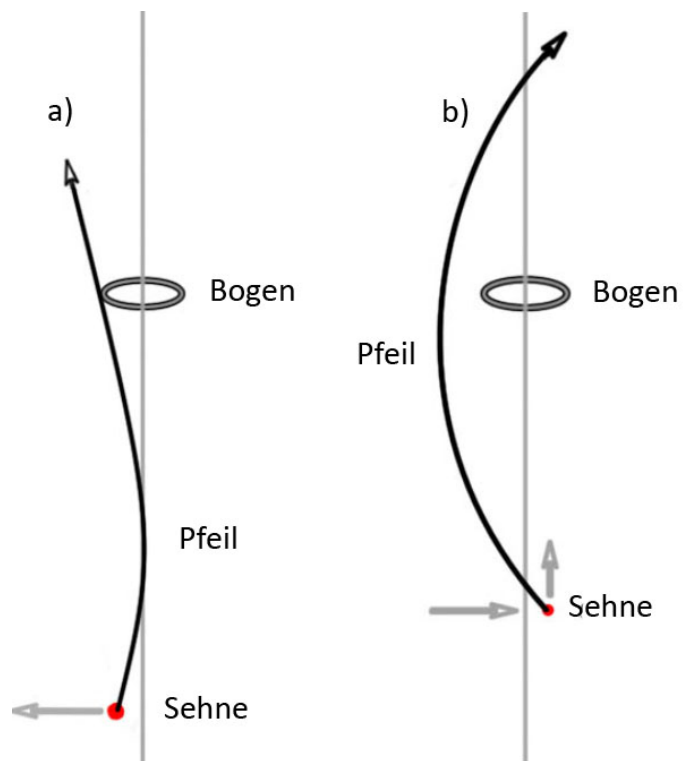


Abbildung 10: a) Pfeil wird durch die Seitwärtsbewegung der Sehne gekrümmt. b) Pfeil krümmt sich um den Bogen herum; eigene Grafik



Abbildung 11: Pfeil verlässt den Bogen und setzt Oszillation fort; eigene Grafik

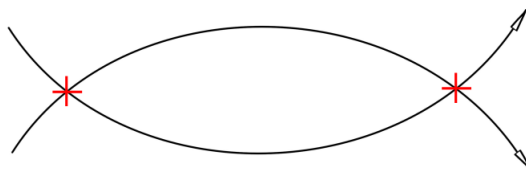


Abbildung 12: Polpunkte eines oszillierenden Pfeils; eigene Grafik

gung der Sehne angestoßene Schwingung bei. [Kooi 1983]

Diese Oszillation des Pfeils erfolgt während des gesamten Fluges mit gleichbleibender Frequenz (ca. 50-60 Hz. [Junkmanns 2013]) aber sinkender Amplitude (siehe Abbildung 2.1.2).

Dabei existieren am Schaft zwei Polpunkte, die während der Oszillation nicht ausgelenkt werden. Die Linie zwischen diesen beiden Punkten bestimmt die Flugrichtung des Pfeils [Meyer 2015] (siehe Abbildung 2.1.2).

Das Maß der Durchbiegung des Pfeils während dieses Vorgangs wird, wie im Punkt "der Spine" auf Seite 9 beschrieben, durch den Spinewert bestimmt. Nur wenn der Spine des Pfeils genau auf den verwendeten Bogen abgestimmt ist, kann die Krümmung des Schaftes um den Bogen herum erfolgen, ohne, dass der Schaft während der Oszillation am Bogen

anschlägt und abgelenkt wird.

Schadenspotential eines Pfeils

Hohe Zuggewichte und Pfeilgeschwindigkeiten werden im modernen Jagdsport oft als Maß für das Schadenspotential eines Bogens verwendet. Entscheidend für den Schaden, den ein Pfeil am Ziel anrichtet, sind jedoch seine kinetische Energie als Maß für die Wucht, mit der ein Pfeil auf ein Ziel auftrifft und Momentum als Maß für das Penetrationspotential eines Pfeils. [Ashby 2005]

Im Belastungstest an den Schädelersatzmaterialien soll ermittelt werden, welche Kraft auf einen Schädel einwirken müsste, um eine Fraktur ähnlich der des Schädels aus Görzig zu erzeugen.

Die kinetische Energie eines Pfeils wird wie folgt berechnet:

$$\frac{1}{2} M * v^2 \quad (2.1)$$

(M=Masse in Kg, v=Geschwindigkeit in m/s; [Pope 2011])

Das Momentum eines Pfeils ist eine lineare Funktion und beschreibt die Kraft der vorwärts-Bewegung eines Objektes. Es berechnet sich aus:

$$\frac{1}{2} M * v \quad (2.2)$$

[Ashby 2005]

Ein Impuls ist eine Krafteinwirkung über Zeit. In dem Moment, in dem ein Pfeil von der Sehne beschleunigt oder von einem Ziel abgebremst wird, wird ein Impuls übertragen, sowohl auf den Pfeil als auch auf das Objekt. Der Impuls als Änderung des Momentums kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$F \Delta t = m \Delta v \quad (2.3)$$

[Ashby 2005]

Zwei gleiche Pfeile mit gleichem Momentum haben nicht notwendigerweise die gleiche Durchschlagskraft. Ein Pfeil, dessen Masse einen höheren Anteil an seinem Momentum ausmacht, wird beim Auftreffen auf ein Ziel langsamer abgebremst und erhält daher zu

jedem Zeitpunkt mehr Momentum als ein Pfeil, dessen Geschwindigkeit einen höheren Anteil an seinem Momentum ausmacht. Ein schwererer Pfeil hat daher einen größeren Impuls. [Ashby 2005]

In lbf steht für *inch pound force* und ist ein Maß für die potentielle Energie eines Bogens. Es beschreibt die Summe der Zuggewichte eines Bogens pro *Inch* Auszugslänge ausgehend von der Standhöhe. [Pope 2011] 1 *In lbf* entspricht 0,113 *Joule*.

$$\sum_{i=SH}^{n=maxA} Lbs_{inch} \quad (2.4)$$

(SH= Standhöhe in Inch, max A= maximale Auszugslänge in Inch; [Pope 2011])

Für die Berechnung der potentiellen Energie eines Bogens wird das Zuggewicht in *Pounds* (0,4536kg) für jeden *Inch*(2,54cm) Auszugslänge mit Hilfe einer Bogenwaage bestimmt.

Die Effizienz eines Bogens beschreibt, wie viel der beim Ziehen der Sehne aufgebauten potentiellen Energie als kinetische Energie auf den Pfeil übertragen wird. Diese Effizienz lässt sich berechnen aus:

$$\frac{E_{kin}Pfeil}{E_{pot}Bogen} \quad (2.5)$$

([Pope 2011])

Am Beispiel: Ein Bogen besitzt im Vollauszug eine potentielle Energie von 520In lbf und überträgt 250In lbf kinetische Energie auf einen Pfeil. Dieser Bogen hätte eine Effizienz von rund 48%. [Pope 2011]

Es nicht möglich, nur von der kinetischen Energie auf die Art des Pfeils und Bogens zu schließen. Ein Bogen mit hohem Zuggewicht, aber geringer Effizienz, könnte auf einen Pfeil ebenso viel Energie übertragen, wie ein Bogen mit geringerem Zuggewicht und besserer Effizienz.

2.2 Eigenschaften des menschlichen Schädels

Der menschliche Schädel ist ein komplexes Gebilde aus 22 zum größten Teil miteinander verwachsenen Einzelteilen mit unterschiedlichen Knochenstrukturen. Die Knochen des Schädeldachs dienen dabei dem Schutz des Gehirns. Die Struktur aus verschiedenen

Schichten hilft dabei, stumpfen und spitzen Gewalteinwirkungen von außen zu widerstehen. [Betts et al. 2017]

Knochenmaterial besteht hauptsächlich aus Kollagen, Kalzium, Phosphat und Wasser. Das Kollagen bildet Stränge bzw. Fasern, an denen sich anorganische Kristalle anlagern. Aufgrund ihrer Struktur werden sie als Hydroxiapatite bezeichnet, bestehen jedoch aus vielen verschiedenen Komponenten (zum Beispiel Magnesiumhydroxid, Fluorid, Sulfat). [Pritchard 1972]

Dazwischen finden sich nur wenige, verschiedene Zelltypen wie Osteoclasten, Osteocyten und Osteoblasten. [Betts et al. 2017]

Das Scheitelbein (Os Parietale) gehört zu den Knochen des Hirnschädels. Es ist in eine rechte und eine linke Hälfte geteilt und grenzt, durch Nahtstellen verbunden, an Stirnbein und Hinterhauptbein. Es handelt sich dabei um einen flachen, dreischichtigen Knochen. Lange Knochen (zum Beispiel Femur) bestehen aus der Diaphyse, einer langen, hohlen Struktur, die die Markhöhle beinhaltet und mit gelbem Knochenmark gefüllt ist. Die äußere Schicht der Diaphyse besteht aus kompaktem Knochenmaterial. An den Enden des Knochens befinden sich die Epiphysen, deren äußere Schichten aus kompaktem Knochen aufgebaut sind und deren Innenraum aus schwammigem Knochengewebe und rotem Knochenmark zusammen gesetzt ist. [Bücker 1992]

Im Gegensatz dazu bestehen flache Knochen, wie die des Os Parietale, lediglich aus drei Schichten: der Diploe, schwammiges, poröses Knochengewebe, und zwei äußere, die Diploe begrenzende Schichten aus kompaktem Knochen, die Kompakta (siehe Abbildung 13).

Kompakter Knochen besitzt eine dichte, lamellare Struktur mit nur wenigen Zwischenräumen (zum Beispiel für Blutgefäße oder Nerven). Schwammiger Knochen hat eine poröse Struktur mit großen, netzartig angeordneten Zwischenräumen. (Die Porosität des Knochens ist dabei der Anteil am Gesamtvolumen, der nicht aus Knochenbewebe besteht.) [Bücker 1992], [Currey 2013]

2.2.1 Mechanische Eigenschaften des menschlichen Schädelknochens

Es wurden bereits viele Studien durchgeführt, um die mechanischen Eigenschaften menschlicher Schädel zu bestimmen. Dabei traten in den Ergebnissen große Unterschiede auf. Gründe dafür sind zum einen natürliche Variationen in den Strukturen der Proben und zum anderen Unterschiede in den Vorgehensweisen der Experimente. [Motherway et al. 2009].

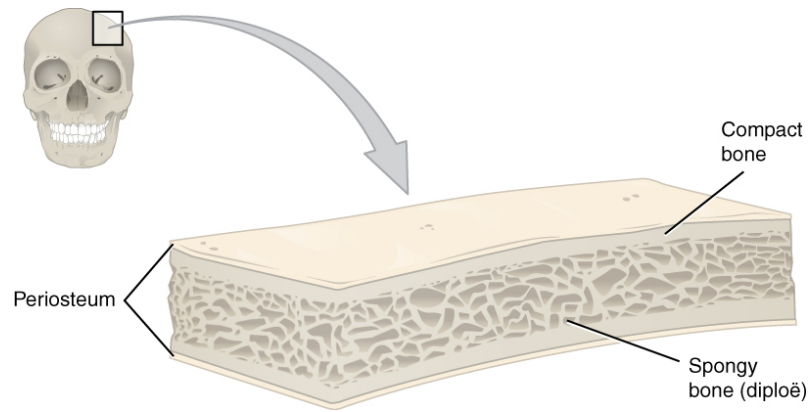


Abbildung 13: Anatomie des flachen Knochens. "This cross-section of a flat bone shows the spongy bone (diploë) lined on either side by a layer of compact bone."; [Betts et al. 2017]

Unterschiede in der Struktur und Biomechanik von Knochen treten nicht nur in verschiedenen Altersgruppen und zwischen den Geschlechtern auf, sondern werden auch von der ethnischen bzw. geografischen Herkunft beeinflusst. [Torimitsu et al. 2013]

Als entscheidende Eigenschaften für das Bruchverhalten des menschlichen Schädels unter Gewalteinwirkung wurden häufig Bruchfestigkeit, Zugfestigkeit und Biegefestigkeit des Knochens untersucht. Currey ([Currey 2013]) beschreibt zwei verschiedene Methoden, um die mechanischen oder elastischen Eigenschaften des Knochens zu bestimmen: mittels Ultraschall oder durch mechanische Verformung.

Bei der Verwendung von Ultraschall wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen im Knochen gemessen. Mithilfe der Formel

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.6)$$

[Currey 2013]

kann das Elastizitätsmodul (Young's Modulus) bestimmt werden. V steht dabei für die Geschwindigkeit der Schallwellen im Knochen, E für das Elastizitätsmodul und ρ für die Dichte des Knochens. Young's Modulus stellt dabei ein Maß für die Biegefestigkeit des Knochens dar. Er wird in Pascal (Pa) angegeben. Ein Problem an dieser Methode ist laut Currey jedoch, dass die Formel für isotrope (d.h. in alle Richtungen die gleichen physikalischen und chemischen Eigenschaften aufweisende) Materialien gilt, Knochen jedoch ein anisotropes Material ist.

Die zweite von Currey genannte Methode basiert auf der mechanischen Belastung von Knochenproben. Hierbei wird entweder eine Probe in einem bestimmten Maß deformiert und die Eigenschaften aus der benötigten Kraft berechnet oder die Probe mit einer bestimmten Kraft belastet und die Eigenschaften aus der entstandenen Deformation berechnet. [Currey 2013]

Experimente mit Hilfe der zuletzt beschriebenen Methode wurden zumeist als 3-Punkt-Biegetests angestellt, bei denen balkenförmige Proben aus verschiedenen Schädelregionen geschnitten wurden. (zum Beispiel: [Wood 1971], [Hubbard 1971], [Torimitsu et al. 2013]) Diese Balken wurden an zwei Punkten fixiert und von einem einstellbaren Gewicht mittig belastet. Unterschiede bestanden dabei unter anderem in den Altersgruppen der Spender, der postmortem-Zeiträume bis zur Untersuchung, dem Zustand der Schädel (frisch, einbalsamiert, eingefroren) und der Stelle der Probenentnahme am Schädel. [Gilchrist et al. 2010], [Wood 1971], [Hubbard 1971], [Motherway et al. 2009].

Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung verschiedener Werte für mechanische Eigenschaften, wie sie von [Roberts et al. 2013] zur Entwicklung eines Schädel-Ersatzmaterials verwendet wurden.

Bone properties	Fracture toughness K IC MPa \sqrt{m}	Tensile strenght (MPa)	Bending modulus (GPa)	Bending strength (MPa)
Human cranial bone ¹	-	-	11.73±0.95	82.0±25.5
Human cranial table ²	-	67.73±17.8	-	-
Human cortical bone (longitudinal) ³	3.07±1.75	-	-	-
Surrogate table (30% milled GL fiber)	2.5	53±4.88		
cranial surrogate	-	-	-	67.9±5.67

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften von menschlichen Schädelknochen; "Mechanical properties of human cranial and cortical bone along with achieved surrogate values."; nach [Roberts et al. 2013]

Erkenntnisse, die in vielen Studien einheitlich erlangt wurden, waren beispielsweise, dass die Geschwindigkeit, mit der die Proben belastet wurden, Einfluss auf die Bruchfestigkeit hatte. Die Proben aus parietalen Schädelregionen waren dazu meist dünner und poröser

¹[Hubbard 1971], [Wood 1971]

²[Robbins et al. 1969], [McElhaney et al. 1970], [Wood 1971]

³[Norman et al. 1996] [Vashishth et al. 1997], [Wang et al. 2004]

als die aus den frontalen Regionen und damit weniger belastbar. Außerdem waren die Knochenproben unter Zug weniger belastbar, als unter Kompression. [Gilchrist et al. 2010], [Motherway et al. 2009], [Hubbard 1971]

Außerdem ist Knochen weniger widerstandsfähig gegen Zugbelastung als gegen Kompression. [Hubbard 1971] Bei der Interpretation der Ergebnisse muss jedoch bedacht werden, dass beim Zuschneiden von Proben Strukturen im Inneren des Knochens zerstört werden und sich somit "künstliche" Schwachpunkte bilden können, die im unbearbeiteten Knochen nicht existiert hätten. [Ascenzi et al. 1972]

2.2.2 Interpretation von Schädelfrakturen

Anhand der Morphologie von Frakturen können Rückschlüsse auf die einwirkenden Kräfte und deren Ursache gezogen werden. Dieser Ansatz kann interdisziplinär sowohl in der Forensik als auch in anthropologischen Untersuchungen angewandt werden. Schwierigkeiten der Beschreibung und Interpretation liegen hier in den Variationen in der Morphologie von Frakturen gleichen Ursprungs und den Ähnlichkeiten in der Morphologie von Frakturen unterschiedlichen Ursprungs. [Lovell 1997]

Ausgehend von der Hypothese, dass ein Pfeilschuss die Ursache der Fraktur war, müsste es sich bei der Verletzung des Görzig-Schädels um eine Fraktur handeln, die perimortem (kurz vor oder zum Zeitpunkt des Todes) durch scharfe, penetrierende Gewalteinwirkung mit relativ hoher Geschwindigkeit entstanden ist. [Berryman et al. 1996], [Lovell 1997] Die Bruchkanten einer Fraktur am frischen Knochen sind typischerweise scharf und durch Körperflüssigkeiten verfärbt, eventuell mit Anhaftungen kleinerer Knochensplitter. Typisch für perimortem Verletzungen sind außerdem plastische Verformungen des Knochens. [Nagaoka 2012], [Messina et al. 2013] Postmortem-Verletzungen zeichnen sich dagegen durch hellere Bruchkanten, kleine Bruchfragmente und ungleichmäßige Verfärbungen aus. Ein sicheres Zeichen für Verletzungen vor dem Tode sind Ansätze von Heilung der Fraktur, jedoch werden diese Spuren erst etwa nach zwei bis drei Wochen sichtbar. [Lovell 1997]

Relativ kleine Bruchflächen werden als charakteristisch für penetrierende Gewalteinwirkung durch Projektile mit hohen Geschwindigkeiten beschrieben. Auf der endocraniellen Seite (Schädelinnenseite) der Eintrittswunde treten schräge, "abgeplatzte" Bruchkanten auf (siehe Abbildung Anhang 34).

Durch Projektile mit sehr hoher Energie verhält sich der Knochen spröder und wird

weniger plastisch verformt. [Berryman et al. 1996]

Da ein Pfeil im Vergleich zu einer Kugel mit eher niedriger kinetischer Energie auftrifft und sein Schadenspotential vor allem durch seine Masse und schneidende Wirkung entfaltet, sollte dieses Phänomen bei einer Pfeilwunde nicht zu erwarten sein. [Spinks 2007]

Die Art und Größe der Wunde hängt von der Form und Geschwindigkeit des Projektils ab. [Lovell 1997]

Durch das Eindringen des Projektils in den Schädelinnenraum erhöht sich zudem der intrakranielle Druck, wodurch die entstandenen Knochenfragmente angehoben werden können. [Berryman et al. 1996]

Mit Hilfe von bildgebenden Verfahren wie Röntgen oder CT-Scan können mit dem bloßen Auge nicht oder nur schlecht sichtbare Auswirkungen von Frakturen wie verdeckte plastische Verformungen oder sehr feine Bruchlinien sichtbar gemacht werden. Daher ist die Anwendung solcher Verfahren wichtig für die genaue Analyse und Interpretation von Schädelfrakturen. [Lovell 1997], [Messina et al. 2013]

2.2.3 Besondere Eigenschaften archäologischer Knochen

Für die Interpretation der Fraktur als Schaden während der Grabung müssen vorerst Informationen über die Eigenschaften des Schädelknochens während der Ausgrabungen, wie den Erhaltungszustand des Knochens, die Bodenbedingungen während der Einbettung und den diagenetischen Zustand des Knochens, berücksichtigt werden. Diagenese ist ein Vorgang der stofflichen Umwandlung, im Falle von Knochen deren chemische und mikrobielle Veränderung und Mineralisierung nach der Einlagerung in den Boden. Dieser Vorgang wird durch die Umgebung bedingt. Daher vollzieht sich die Umwandlung der Knochenbestandteile nicht gleich schnell. [Collins et al. 2002]

Es kann davon ausgegangen werden, dass bei diesem Prozess (zum Beispiel durch den Abbau von Kollagen) die mechanischen Eigenschaften des Knochens derart verändert werden, dass sich Frakturen, die durch den gleichen mechanischen Vorgang entstehen, beim frischen Knochen von denen von archäologischen Funden deutlich unterscheiden. [Messina et al. 2013], [Villa et al. 1991]

Beispielsweise sind Knochen, die in trockenen, sandigen Wüstenumgebungen gefunden wurden, meist sehr brüchig. Die Sedimente sind sehr locker und halten Wasser eher schlecht. Durch die Verdunstung von Wasser aus tieferen Bodenschichten steigt dieses

auf und wird an eingelagerten Knochen aufgehalten. Die Ionen aus den Sedimenten kristallisieren im Knochen zu Salzen, was zu einer räumlichen Ausdehnung und zur Entstehung feiner Fissuren im Knochen führt. [Grupe 1995]

In der Arbeit von Turner-Walker [Turner-Walker et al. 1995] konnte gezeigt werden, dass die verringerte Belastbarkeit von archäologischen Knochen vor allem durch die Hydrolyse von Kollagen und vergrößerte Porosität durch den Einfluss von Mikroorganismen bedingt wird. Bei gut erhaltenen Knochen (mit einem Stickstoff-Gehalt von über 3,5%) war eher das fehlende Kollagen für den Verlust der mechanischen Belastbarkeit verantwortlich.

2.2.4 Eigenschaften von Ersatzmaterialien für Belastungstests

Bei einem Skelettfund mit Gewalteinwirkung können forensische Erkenntnisse auf dem Gebiet der Biomechanik angewandt werden, um nachzuvollziehen, wie eine Verletzung entstanden sein könnte oder ob die Hypothese über einen Tathergang zu den vorhandenen Spuren passt. Nicht immer können dazu vorhandene Dokumentationen über die Auswirkungen bestimmter Krafteinwirkungen herangezogen werden. Entweder, weil die Spuren nicht eindeutig zugeordnet werden können oder weil es noch keine entsprechenden Dokumentation über voran gegangene Fälle zu einer Hypothese gibt. In dieser Situation kann versucht werden, die Verletzungen durch Experimentalsreihen zu simulieren, um Aufschluss über Tatwaffe und Tathergang zu erlangen. [Raymond et al. 2015]

In Fällen, in denen Experimente aus praktischen oder ethischen Gründen nicht an menschlichen Körpern durchgeführt werden können, werden zur Simulation Tiere als Modelle für den menschlichen Körper verwendet. Dabei bestimmt der Verwendungszweck die Art des Tier-Modells. Schweine bieten sich als sehr gute Modelle an, da sie in Größe, Gewicht, Physiologie und Anatomie dem Menschen sehr ähnlich sind. Für diese Arbeit sollen Belastungstests am Os Parietale durchgeführt werden. Dieser Knochen ist beim Menschen relativ groß und lateral konvex; Das des Schweines ist im Vergleich dazu kleiner und viereckig geformt. Im Querschnitt ist der Schädelknochen des Schweines dicker als der des Menschen, jedoch mit dünneren äußeren Schichten und dickerer Diploe. [Jordana et al. 2013]

In der Forschung werden zumeist kleine Nagetiere wie Ratten und Mäuse zur Simulation von Schädel- oder Hirntraumata benutzt, da sie kleiner und weniger kostenintensiv sind. [Xiong et al. 2013]

Manley [Manley et al. 2006] kritisierte in einer Arbeit jedoch, dass Studien zur Auswirkung

von TBI (traumatische Verletzungen des Hirns) an Nagetieren kaum Fortschritte in der Behandlung von Patienten erzielen. Bessere Ergebnisse wären aufgrund der höheren Ähnlichkeiten bei Schweinen zu erwarten. Außerdem wurden Forschungen zu den Schäden von Projektilen mit hoher kinetischer Energie auch an Katzen durchgeführt. [Xiong et al. 2013], [Carey et al. 1989]

Die vorhandenen Unterschiede zwischen den Spezies und einzelnen Individuen müssen bei der Interpretation solcher Ergebnisse berücksichtigt werden.

Es wurden ebenfalls nach Materialien geforscht, die für die möglichst exakte Simulation des menschlichen Schädels ohne Tiermodell geeignet sind. In der Arbeit von Roberts [Roberts et al. 2013] wurde ein Schädelersatzmaterial entwickelt, das dem drei-Schichten-Aufbau des menschlichen Schädelknochens entspricht und möglichst ähnliche mechanische Eigenschaften aufweist. Dabei stellte sich heraus, dass eine Mischung aus Epoxidharz (EPON 815C) und 30-35% gemahlenen Glasfasern in einer Stärke von 2mm für die dichten, äußeren Knochenschichten und verschiedene Schaumstoffe (U.S. Foam 16# und BJB-TC 81) in einer Stärke von 4mm als Ersatz für die poröse Diploe in etwa der Biegefestigkeit von 8mm starken menschlichen Schädelknochen entspricht.

2.3 Betrachtung der archäologischen Funde

2.3.1 Eigenschaften des Schädels aus Grab 61

Kleinecke [Kleinecke 2011] beschreibt den Schädel Fund in ihrer Magisterarbeit wie folgt: Der Schädel stammt aus einer Grabstätte, in der mehrere Individuen gemeinsam beerdigt wurden. Er ist Teil einer sogenannten Hockerbestattung (Bestattung mit angewinkelten Beinen), darüber befand sich eine Streckerbestattung (Bestattung mit gestreckten Beinen). Im oberen Teil des linken Scheitelbeins befindet sich ein kreisrundes Loch, dessen genauer Ursprung nicht geklärt werden konnte (siehe Abbildung 14).

Die äußere Knochenstruktur des Schädels ist unnachgiebig, trocken (nicht fettig) und glatt.

Die Fraktur befindet sich im linken, unteren Teil der linken Hälfte des os parietale, ca. 5mm von der coronalen Schädelnaht (sutura coronale) entfernt.

Die Ränder der Fraktur sind unregelmäßig aber glatt. Das Loch ist unregelmäßig oval geformt; der größte Durchmesser beträgt 103mm. Der Lochdurchmesser ist auf der Innen-



Abbildung 14: linke Seite des Görzig-Schädels; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017
 seite größer als auf der Außenseite, da die innere Kompakta flach "abgeplatzt" ist (siehe Abbildung 15).

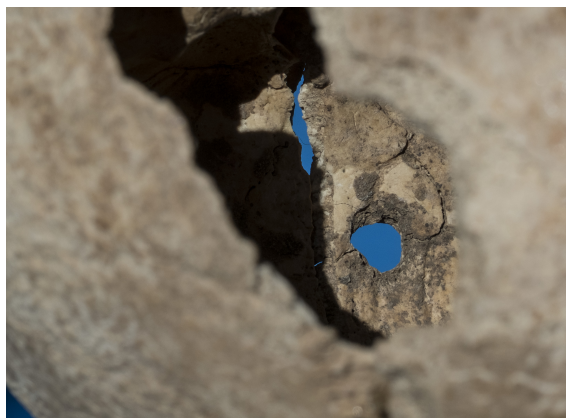


Abbildung 15: Fraktur auf intrakranieller Seite; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017

An der der coronalen Schädelnaht zugewandten Seite der Fraktur befindet sich ein ca. 5mm langer Riss zur Schädelnaht hin. Der Bruch ist durch alle Knochenschichten durchgängig und geht im 90 Grad Winkel von der Fraktur aus. Auf extrakranieller Seite sind mit bloßem Auge keine weiteren Bruchlinien erkennbar. Auf intrakranieller Seite sind mindestens zwei von der Fraktur ausgehende Risse erkennbar, sowie größere Bruchlinien in der näheren Umgebung der Fraktur, die möglicherweise auf elastische Verformung des Schädels hindeuten.

Der Boden, in dem die Gräber aufgefunden wurden, wurde als kalkreicher Lößböden und ideal zur Erhaltung von Skeletten beschrieben. Dieser Lößboden besteht hauptsächlich aus Schwarzerden, Parabraunerden und Pseudogleye. Es handelt sich um einen gut

durchlüfteten Boden mit guten Wasserhalteeigenschaften.

Durch die schlechte Dokumentation der Ausgrabungen und potentiellen Schäden, die währenddessen entstanden sein könnten, wird die Unterscheidung zwischen perimortem und postmortem Schäden erschwert. [Kleinecke 2011], [Sigler-Eisenberg 1985]

2.3.2 Eigenschaften der Pfeilspitze aus Grab 61

Bei der Pfeilspitze handelt es sich um eine von insgesamt 11 Funden aus den Gräbern 61, 52 und 71. Diese Spitze ist die einzige, die in Grab 61 gefunden wurde und die einzige, die im Gussverfahren aus Bronze hergestellt wurde. Sie ist 44,3mm lang mit zwei Flügeln ohne Widerhaken. Sie besitzt eine Tülle, in die der Schaft zur Befestigung eingesteckt wurde. Die Tülle weist einen länglichen Schlitz auf, der entweder eine heraus gebrochene Fehlstelle im Material sein oder zur Befestigung gedient haben könnte. [Kleinecke 2011] Die in hunnischen Gräbern gefundenen Pfeilspitzen dagegen sind in der Mehrheit 3-9cm



Abbildung 16: Pfeilspitze aus Grab 61; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017

lang, aus Eisen (manchmal auch Knochen), mit drei geschliffenen Flügeln und einer "Angel" für die Befestigung am Schaft. [Boña 1991]

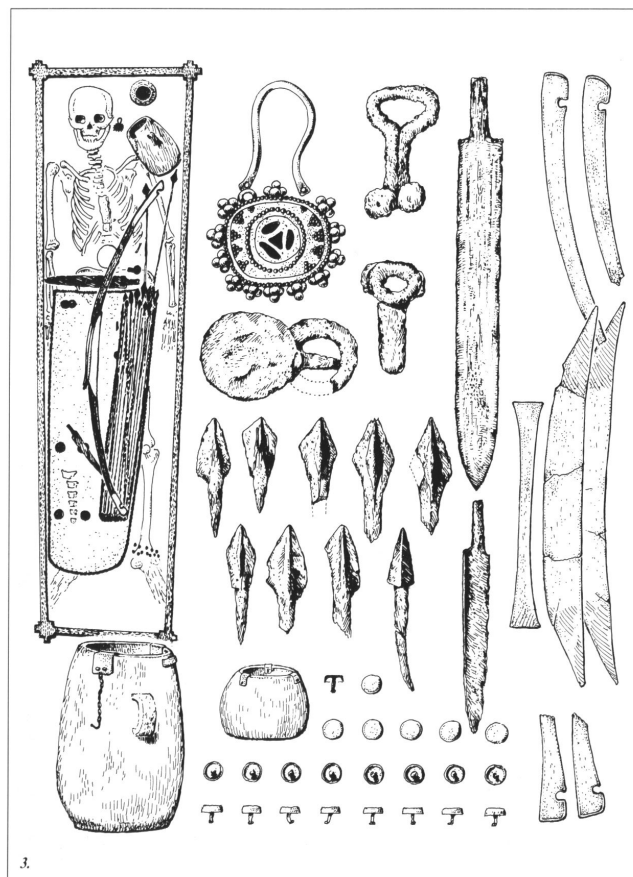
Einige Pfeilspitzen dieser Art sind in Abbildung 17 dargestellt. (Siehe auch: Anhang Abbildung ??-29)

Daneben kommen auch "flache Pfeilspitzen mit rhombischen Blatt und nagelartige mit massivem Kopf" vor. [Boña 1991]

Beispielhaft dafür ist der Fund eines Kriegergrabes aus dem 4.-5. Jh. 17

Die Form der Pfeilspitze aus Grab 61 entspricht eher einem Typ, der bereits seit der jüngeren Bronzezeit bis zur jüngeren Hallstadtzeit in Europa verbreitet war. Pfeilspitzen, die der aus Grab 61 ähneln, wurden bereits unter anderem in Mähren und im Tollensetal gefunden (siehe Abbildung Anhang 33). [Říhovsky 1996], [Lidke et al. 2015]

Schmidt [Schmidt 1961], der in seiner Arbeit verschiedene mitteldeutsche Funde aus der Völkerwanderungszeit betrachtete, beschrieb den unter Funden aus dem 5. Jh. häufigsten vorkommenden Typ Pfeilspitze als meist zweiflügelig, mit rhombischen Blatt und geschlitzter Tülle. Darstellungen dieses Types verdeutlichen, dass sie der Pfeilspitze aus Grab 61 eher unähnlich sind. (siehe Abbildung 19)



30



Abbildung 18: Pfeilspitze Typ 249; Ausschnitt aus Anhang 32; [Říhovský 1996]

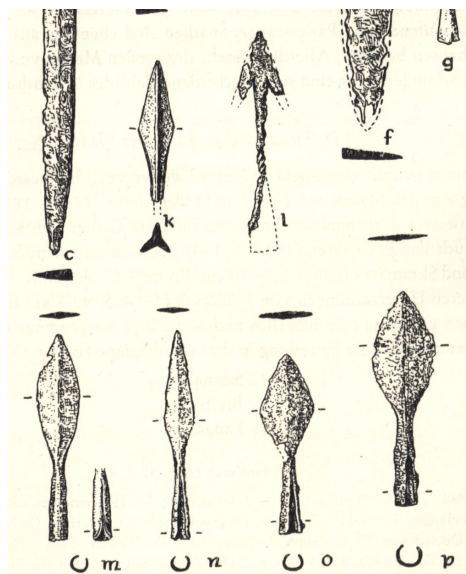


Abbildung 19: Pfeilspitzen aus der späten Völkerwanderungszeit; Ausschnitt aus Anhang 31; [Schmidt 1961]

Methodik

3.1 Belastungstest

Um die Hypothesen über die Entstehung der Schädelfraktur zu überprüfen, wurden Belastungstests an Schweineschädeln (Hausschwein) durchgeführt.

Da sich erst im Laufe der Arbeit herausstellte, dass es nicht möglich sein würde, die Hypothese über die Entstehung der Fraktur durch einen Pfeilschuss zu überprüfen, wurde die zweite vorgestellte Annahme getestet.

Es wurde die Hypothese überprüft, die Schädelfraktur sei durch die im Erdboden weich gewordene Struktur des Schädels während der Ausgrabungen verursacht worden.

3.1.1 Einschränkungen

Für die Belastungstests mussten einige Einschränkungen vorgenommen bzw. beachtet werden:

Leider war es aus logistischen und zeitlichen Gründen nicht möglich, ein 3D-Modell von der im Grab gefundenen Spitze anzufertigen, um daraus Bronze-Abgüsse herzustellen.

Es wurde versucht, ein Modell der Spitze auf der Grundlage von Fotoaufnahmen zu fertigen. Ein so entstandenes Modell war jedoch zu ungenau in Größe und Form, um es für einen Abguss zu verwenden.

Da kein Modell der Pfeilspitze und somit keine Testergebnisse zur Verfügung standen, konnten auch die ursprünglich geplanten realen Beschuss-Tests mit Pfeil und Bogen zum Vergleich der Ergebnisse nicht durchgeführt werden.

Es wurden Schweineschädel gewählt, da das Schwein, wie bereits auf Seite 26 beschrieben, dem Menschen anatomisch sehr ähnlich ist.

Schädelknochen von Schweinen sind jedoch dicker als die von Menschen. Die für die Tests



Abbildung 20: verwendete Schnureisen; eigene Grafik

verwendeten Schweineschädel sind an der Einstichstelle ca. 6-8mm dicker als der Görzig-Schädel.

Die Belastungstests wurden daher nicht am viel massiveren Scheitelbein (15-37mm) des Schweins vorgenommen, sondern am Stirnbein (Os frontale, 12-13mm). Da die Schweineschädel aus einem lokalen Schlachtbetrieb stammen, ist nicht auszuschließen, dass die Tiere mittels Bolzenschuss auf das Stirnbein betäubt wurden und der Knochen dadurch bereits vor dem Experiment geschwächt war. Äußerliche Brüche an den verwendeten Schädeln waren nicht zu erkennen.

Die Belastungstests wurden mit einem vierkantigen Schnureisen (zum Abstecken von Grabungsarealen) mit Kantenlänge 7x7mm durchgeführt (siehe Abbildung 20). Ein solches Werkzeug könnte aufgrund der Spitze leicht in einen weichen Knochen eingedrungen sein.

Es wurden auch Markiernägel in Erwägung gezogen. Diese waren jedoch mit 3mm zu dünn, um aussagekräftige Testergebnisse zu erzeugen.

Für den Test wurden nur zwei Schweineschädel verwendet, da die Vorbereitung sich als sehr aufwändig herausgestellt hatte und die restlichen Schädel für spätere Versuche mit Pfeilspitzen und anderen Grabungswerkzeugen zur Verfügung stehen sollten.

3.1.2 Vorbereitung

Die zu überprüfende Hypothese geht davon aus, dass die Fraktur zufällig während den Ausgrabungen passiert sei und die Morphologie der Bruchstelle aufgrund der durch die lange Zeit im Boden weichen und porösen Knochenstruktur zustande kam.

Die Schweineschädel mussten entsprechend der zu überprüfenden Hypothese vorbereitet werden, da sich frischer Knochen unter Belastung anders verhält, als lange im Erdboden gelagerter Knochen. (siehe dazu: Seiten 24 - 25)

Um diesen Zustand zu simulieren, wurden acht Schweineköpfe (Hausschwein) zunächst einige Stunden in Wasser erhitzt, der Knochen frei gelegt und die Schädel wieder in Wasser erhitzt. Nach dem Entfernen aller weichen Gewebeteile wurden die Schädel ca. 2 Stunden in Waschmittel-Lauge¹ gekocht, um letzte Gewebereste² zu entfernen und das für die Elastizität des Knochens wichtige Kollagen zu zersetzen. Da auch während das langen Lagerns im Erdboden das Kollagen im Knochen abgebaut wird, wird der Schädelknochen auf diese Weise künstlich "gealtert". Es kann allerdings durch das Kochen in Waschmittel-Lauge nur der Abbau von Kollagen simuliert werden, jedoch nicht die Veränderungen durch Mineralisierung des Knochens, Einfluss von Mikroorganismen oder die spezifischen Lagerbedingungen eines bestimmten Sediments. Auch ist es nicht möglich, den Kollagengehalt in den Schweineschädeln dem Kollagengehalt des ausgegrabenen Schädels anzugleichen.

Da in der zu untersuchenden Hypothese angenommen wird, dass der Görzig-Schädel durch die Feuchtigkeit im Erdboden "weicher" wurde, wurden die Schweineschädel nach der Vorbereitung bis zum Experiment ebenfalls feucht gelagert.

Für das Experiment wurden Schädel gewählt, die möglichst wenige Beschädigungen durch die Schlachtung und Vorbereitung aufwiesen. Diese wurden zusätzlich mit Erde (leicht feucht, ohne große Steine, in Teilen sandig und lehmig) gefüllt, um den Zustand des Görzig-Schädels während der Ausgrabungen anzunähern und den Widerstand der Erde im Schädel nachzustellen.

3.1.3 Durchführung

Für die Versuchsreihe wurde eine MTS Landmark (500kN) Universal-Testmaschine verwendet. Ein Schnurisen wurde in die obere Halterung eingespannt. Auf die untere Halterung wurde eine Holzplatte als Unterlage für den Schädel gelegt. Darauf wurden die mit Erde gefüllten Schädel (in einer Plastiktüte) platziert. Der Oberkiefer wurde mit Hilfe eines Metallzylinders gestützt, um das frei gelegte Stirnbein waagrecht zu positionieren

¹Inhaltsstoffe: <5%: Nichtionische Tenside, Phosphonate, Polycarboxylate, Seife. 15-30%: Bleichmittel auf Sauerstoffbasis, Zeolithe

²da im Zweifelsfall noch Gewebereste im Inneren des Schädels zurück bleiben können, setzt sich nach dem Auskochen die Verwesung fort und die Schädel müssen dementsprechend hygienisch und geruchsdicht gelagert werden

und ein Wegrutschen während der Belastung zu verhindern.

Es wurden insgesamt drei Versuche durchgeführt:

Für Versuch 1 wurde die Spitze des Schnureisens mit wenigen Millimetern Abstand mittig über dem Stirnbein auf der mittleren Schädelnaht positioniert (siehe Abbildung 21).

Die Belastung erfolgte mit einer Geschwindigkeit von 0,1mm/s über einen Weg von 50mm.

Das Eindringen des Werkzeugs in den Schädelknochen erfolgte mit wenig Widerstand.

Nach dem Versuch steckte das Werkzeug so fest im Knochen, dass es nötig war, leicht am Schädel zu ziehen und zu drehen, um es zu entfernen (siehe Anhang Abbildung 38).

Für Versuch 2 (Versuch 2.1) wurde ein neuer Schädel verwendet. Die Spitze des Schnureisens wurde über dem Stirnbein links der mittleren Schädelnaht positioniert.

Die Belastung erfolgte mit einer Geschwindigkeit von 100mm/s über einen Weg von 50mm.

Auch bei diesem Schädel erfolgte das Eindringen in den Schädel mit wenig Widerstand.

Der Schädel musste ebenfalls bewegt werden, um das Werkzeug daraus zu lösen.

Ein dritter Versuch (ab hier mit Versuch 2.2 beschrieben) wurde durchgeführt, da bei Versuch 2.1 eine falsche Abtaststrategie für die Aufzeichnung der ausgeübten Kraft eingestellt war und damit zu wenig Datenpunkte für eine Kraft-Weg-Kurve zur Verfügung standen.

Die Belastung erfolgte erneut mit 100mm/s über einen Weg von 50mm.

Beim Entfernen des Werkzeugs zerbrach der Schädel entlang der Schädelnähte (siehe Abbildung Anhang 40).

3.2 Testergebnisse

Zwischen Experiment und Untersuchung wurden alle Schädel und Schädelteile trocken gelagert.

Zunächst wurden die relevanten Schädelteile fotografisch dokumentiert (siehe u.a. Anhang)

Tabelle 2 auf Seite 40 stellt eine Zusammenfassung der Testergebnisse dar.

Versuch 1: bei der Untersuchung war die Oberfläche von Vergleichsschädel 1 trocken, kaum fettig und die Fasern des Knochens leicht aufgeraut.



Abbildung 21: Vergleichs-Schädel 1 im Versuchsaufbau; eigene Grafik

Die Schädelnähte sind in Folge der Vorbereitung und Belastung des Schädels zu großen Teilen aufgelöst oder auseinander gebrochen (mittlere Schädelnaht).

Durch die Krafteinwirkung mittig auf dem Stirnbein ist der Schädel entlang der mittleren Sutura gespalten.

Der Knochen ist an der Durchstoßstelle ca. 14mm dick.

Die Einstichstelle ist vierkantig und "rautenförmig". Der größte diagonale Durchmesser beträgt 11mm. Der größte horizontale Durchmesser beträgt 7mm.

Die Kanten der Einstichstelle sind leicht plastisch zur Lochmitte hin verformt.

Auf extrakranieller Seite sind an den Ecken der Einstichstelle leichte Einrisse (weniger als 1mm) zu erkennen. Sonst sind keine weiteren Risse oder Bruchlinien sichtbar.

Auf intrakranieller Seite ist der Lochdurchmesser etwas größer als auf der Außenseite. Die innere Kompakta wurde scheinbar etwas ins Schädellinnere gedrückt. Davon ausgehend sind keine weiteren Risse oder Verformungen zu erkennen.

Abbildung 23 stellt die Kraft-Weg-Kurve von Versuch 1 dar. Die aufgewendete Kraft steigt



Abbildung 22: Fraktur in Vergleichsschädel 1; eigene Grafik

mit zunehmender Eindringtiefe weitestgehend linear an. Durch die Spitze des Werkzeuges ist die zu Anfang nötige Kraft sehr klein ($< 50\text{N}$). Je weiter das Werkzeug in den Schädel eindringt, desto größer ist die Druckfläche und umso mehr Kraft wird aufgewendet. Das Maximum der Kraft-Weg-Kurve bezeichnet den Punkt, an dem der größte Durchmesser des Werkzeuges erreicht ist. Dies ist die "Durchschlagskraft". Sie liegt bei ca. 550N . Danach müssen nur noch Reibungskräfte überwunden werden (Einschätzung von Prof. Dr.-Ing. Frank Hahn, 2017).

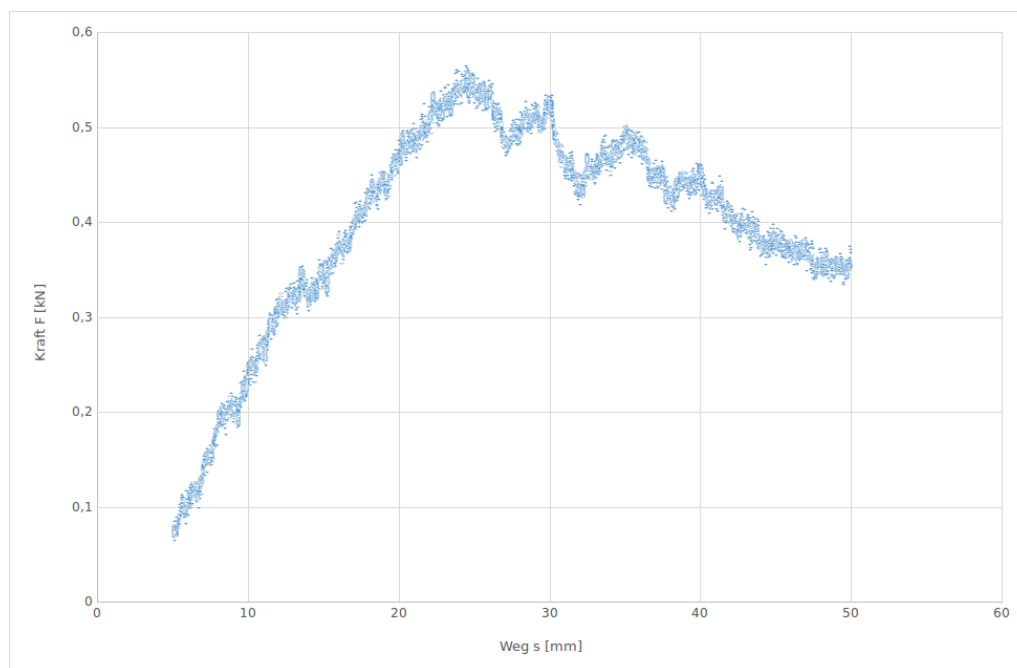


Abbildung 23: Kraft-Weg-Kurve von Versuch 1

Versuch 2.1: Die Oberfläche von Vergleichsschädel 2 war bei der Untersuchung in ähnlichem Zustand wie Vergleichsschädel 1.

Die Schädelnähte sind durch die Vorbereitung angelöst und durch die Belastung an mehreren Stellen gebrochen, sodass Schädel 2 in Einzelteilen vorliegt (siehe Abbildung Anhang 40).

Der Knochen ist an der Einstichstelle 12mm dick. Er wurde nicht durchstoßen. Die Ursache könnte ein Verrutschen des Schädels durch die höhere Geschwindigkeit und die Unterlage aus Erde sein (siehe Abbildungen Anhang 42-43).

Die Einstichstelle ist vierkantig und "sternförmig". Der größte diagonale Durchmesser beträgt 11mm, der größte horizontale Durchmesser beträgt 4mm.

Die Kanten der Einstichstelle sind stark elastisch zur Lochmitte hin verformt, sodass die Einstichstelle "sternförmig" wirkt.

Auf extrakranieller Seite sind von den Ecken des Einstichs kleine Einrisse (1-3mm) zu erkennen.



Abbildung 24: Fraktur in Vergleichsschädel 2, Versuch 1; Grafik von Marie-Luise Heuschel, 2017

Versuch 2.2: Der Knochen ist an der Einstichstelle 13mm dick. Er wurde ebenfalls nicht durchstoßen; vermutlich durch die gleichen Vorgänge wie bei Versuch 2.1 (siehe Abbildungen Anhang 44-45).

Die Einstichstelle ist wie bei Versuch 2.1 vierkantig und sternförmig. Der größte diagonale Durchmesser beträgt 7,9mm. Der größte horizontale Durchmesser beträgt 4mm.

Die Kanten des Einstichs sind stark elastisch zur Lochmitte hin verformt.

Auf extrakranieller Seite sind keine von der Einstichstelle ausgehenden Risse oder Bruchlinien erkennbar.

Abbildung 26 stellt die Kraft-Weg-Kurve von Versuch 2.2 dar. Die Kraft steigt wie bei Versuch 1 weitestgehend linear an (Die Schwingungen in der Kurve entstehen durch Trägheitseffekte der Kraftmessdose). Die maximale aufwendete Kraft liegt bei ca. 870N. Die höhere Durchschlagskraft kann durch die schnellere Belastung entstehen (Einschätzung von Prof. Dr.-Ing. Frank Hahn, 2017).



Abbildung 25: Fraktur in Vergleichsschädel 2, Versuch 2; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017

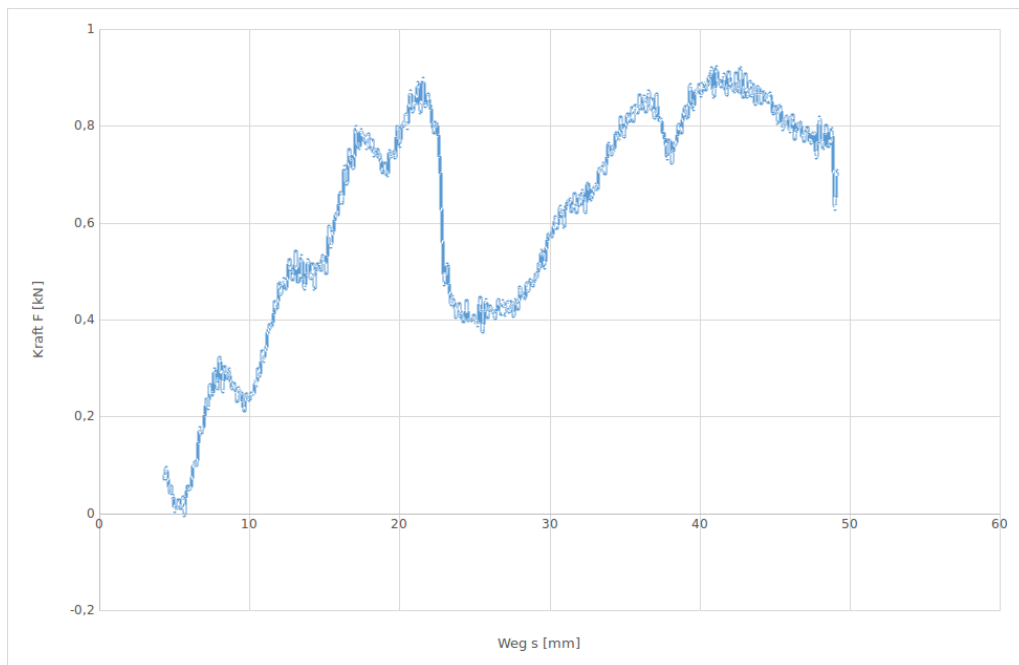


Abbildung 26: Kraft-Weg-Kurve von Versuch 2.2

Schädel	Vergleichsschädel 1	Vergleichsschädel 2 (Versuch 1)	Vergleichsschädel 2 (versuch 2)	Görzig-Schädel
Parameter Belastung	0,1mm/s über 50mm Weg	100mm/s über 50mm Weg	100mm/s über 50mm Weg	-
Eigenschaften Knochen	- Oberfläche trocken - wenig fettig - leicht aufgeraute Knochenfasern	- Oberfläche trocken - wenig fettig - leicht aufgeraute Knochenfasern	- Oberfläche trocken - wenig fettig - leicht aufgeraute Knochenfasern	- Oberfläche trocken - nicht fettig - glatte Fasern
Position d. Einstichs	mittig in Stirnbein	Stirnbein, links der mittleren Schädelnaht	Stirnbein, rechts der mittleren Schädelnaht	linkes Scheitelbein nahe coronaler Schädelnaht
Knochenstärke an Einstichstelle	14mm	12mm	13mm	5-6mm
Form d. Einstichs	rautenförmig	"sternförmig"	"sternförmig"	unregelmäßig oval
größter Durchmesser diagonal	11mm	11mm	7,9mm	10,3mm
größter Durchmesser horizontal	7mm	4mm	4mm	-
elastische Verformungen	Kanten leicht zur Lochmitte gewölbt	Kanten stark zur Lochmitte gewölbt (eine Kante stärker)	Kanten stark zur Lochmitte bewölbt	keine sichtbar Bruchlinie
Frakturlinien extrakraniell	- leichte Einrisse an Ecken (<1mm) - keine weiteren Risse	kleine Einrisse an Ecken (1-3mm)	keine Bruchlinien erkennbar	im 90 Grad Winkel zur coronalen Schädelnaht (ca. 3mm) - Bruchlinie im 90 Grad Winkel zur coronalen Schädelnaht (ca. 3mm)
Frakturlinien intrakraniell	keine	kein Durchstoß erfolgt	kein Durchstoß erfolgt	- "abgeplatzte" innere Kompakta - mindestens zwei kleinere Risse - mögliche Anzeichen plastischer Verformung
andere Auswirkungen d. Belastung	Schädel entlang der mittleren Schädelnaht gespalten	schräger Einstich (vermutl. durch Verrutschen des Schädels)	Schädel nach erneuter Belastung entlang der Schädelnähte auseinander gebrochen	-

Tabelle 2: Zusammenfassung der Belastungstest-Ergebnisse

Diskussion

4.1 Interpretation und Vergleich der Ergebnisse

Die Versuche an Schädel 1 und Schädel 2 wurden mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und an unterschiedlichen Punkten am Knochen durchgeführt. Auch gibt es natürliche, nicht beeinflussbare Unterschiede in den Knochenstrukturen der Schädel. Außerdem konnten die beiden versuchten Einstiche an Schädel 2 durch Fehler im Versuchsaufbau den Knochen nicht durchstoßen.

Daher können nur die Morphologien der Einstiche auf der Schädelaußenseite miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind jedoch aufgrund der sehr kleinen Testgruppe und der vielen beeinflussenden Faktoren nur bedingt aussagekräftig und nicht für eine statistische Auswertung geeignet.

Faktoren, die Einfluss auf die Morphologie der Fraktur haben können:

- Geschwindigkeit
- Form und Größe des Objekts
- Einwirkende Kraft
- Beschaffenheit des Knochens (z.B. Feuchtigkeit, Porosität, Alter, Kollagengehalt)

Bei allen Versuchen konnte beobachtet werden, dass die Kanten der Fraktur sich leichter (Versuch 1) oder stärker (Versuch 2.1 und 2.2) zur Lochmitte hin verformt hatten. Diese plastische Verformung nach Entfernen des Werkzeuges könnte auf den hohen Feuchtigkeitsgehalt oder auch auf einen immer noch hohen Fettgehalt des Knochens hin deuten.

Die Form der Einstichstellen weicht sehr stark von der Form der Fraktur im Görzig-Schädel ab. Es kann daher angenommen werden, dass das Objekt, das die Fraktur verursachte,

nicht vierkantig war. Ein runder bis ovaler Querschnitt ist wahrscheinlicher.

Da die Versuche 2.1 und 2.2 mit höherer Geschwindigkeit als Versuch 1 erfolgten und sich die resultierenden Frakturen ebenfalls stärker verformten, kann ein Einfluss der Geschwindigkeit der Krafteinwirkung auf die Morphologie der Fraktur vermutet werden. Diese Beobachtung wird in diversen Arbeiten bestätigt (Vergleiche dazu Seite 2.2.2).

Es fällt auf, dass bei keinem der Versuche große Bruchlinien oder Fragmentierung des Knochens auftraten. Lediglich $<1\text{-}3\text{mm}$ lange Risse konnten beobachtet werden.

Die extrakranielle Seite der Fraktur am Görzig-Schädel zeigt, dass bei diesem keine weiteren Risse oder Brüche abgesehen von einem Bruch zur coronalen Sutura hin erfolgt sind. Dieser Bruch muss allerdings nicht zwingend zeitgleich mit der Fraktur entstanden sein. Ob eine plastische oder elastische Verformung des Einstichs erfolgt ist, lässt sich nicht feststellen.

Nur kleine, wenige Bruchlinien auf der Schädelaußenseite und das Fehlen von Fragmenten sind eine Gemeinsamkeit zwischen Görzig-Schädel und Vergleichsschädeln, die die untersuchte Hypothese stützen.

In der Arbeit von Jordana [Jordana et al. 2013] wurden ähnliche Versuche angestellt, um die Frakturbildung in Bezug auf das Postmortem-Intervall zu beobachten.

Die verwendeten Schweineschädel wurden jedoch nicht gekocht oder chemisch behandelt. Das Gewebe wurde mit einem Skalpell entfernt und die Schädel teilweise frisch verwendet und teilweise einige Tage bis Monate im Erdboden gelagert. Die Belastung erfolgte an trockenen Schädeln. Die Versuche wurden mit einem Fallwerk durchgeführt. Im Unterschied zur in dieser Arbeit verwendeten Materialtestmaschine fällt im Fallwerk ein Gewicht in einer Führung auf das Testobjekt. Die Schweineschädel wurden in der Arbeit von Jordana nicht durchstoßen. Durch diese Unterschiede in der Vorbereitung und Vorgehensweise sind die Ergebnisse nur bedingt vergleichbar.

Im Kapitel "Interpretation von Schädelfrakturen" wurden bereits typische Anzeichen für perimortem und postmortem Verletzungen beschrieben. Für Brüche nach dem Tode sprechen beispielsweise helle oder unregelmäßig verfärbte Bruchkanten. Die Bruchkanten des Lochs im Görzig-Schädel sind ungleichmäßig dunkel verfärbt (Vergleiche dazu Abbildung 36). Da der Schädel jedoch bereits 1958 ausgegraben und seitdem immer wieder

Untersuchungen ausgesetzt war, kann die Verfärbung auch nachträglich eingetreten sein. Ein weiteres Anzeichen für postmortem Frakturen ist die Entstehung von kleinen Knochenfragmenten. Dies ist beim Görzig-Schädel nicht zu beobachten. Jedoch ist dies auch nicht an den Schweineschädeln zu beobachten gewesen. Daher könnte das Fehlen auch eine Auswirkung des hohen Feuchtigkeitsgehalt sein.

Für eine Einschätzung über die Hypothese der Pfeilwunde konnten zwar keine Experimente angestellt werden, jedoch kann die Morphologie der Fraktur im Görzig-Schädel mit anderen, mit großer Wahrscheinlichkeit als Pfeilwunde identifizierten Frakturen verglichen werden.

Hierfür eignet sich ein Schädel, der 1998-1999 bei Messina ausgegraben und in der Arbeit von Messina [Messina et al. 2013] untersucht wurde.

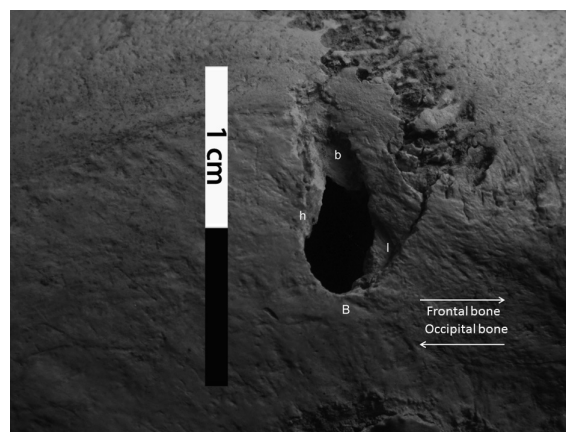


Abbildung 27: Fraktur auf der Schädelaußenseite des Schädelfundes aus Messina, "margins of the perforation on the ectocranial surface"; [Messina et al. 2013]

Der Schädel weist eine als perimortem-Verletzung durch ein scharfes bzw. spitzes Objekt identifizierte Fraktur im rechten parietalen Schädelknochen auf.

Die Fraktur ist länglich, an einer Seite rund und an der gegenüber liegenden Seite spitz zulaufend (siehe Abbildung 27). Die Form der Fraktur kann auf die Form des einwirkenden Objektes oder einen schrägen Auftrittswinkel zurück zu führen sein. Auf extrakranieller Seite wurden keine großen Risse oder Bruchlinien festgestellt. Es kam jedoch zur einer Fragmentierung des Knochens, die beim Görzig-Schädel nicht auftritt. Die Fragmente sind mit dem restlichen Knochen verbunden.

Der Lochdurchmesser ist auf der Schädellinnenseite ebenfalls etwas größer. Auch hier finden sich "abgeplatzte" Knochenfragmente. Zusätzlich wurden mögliche Spuren elastis-

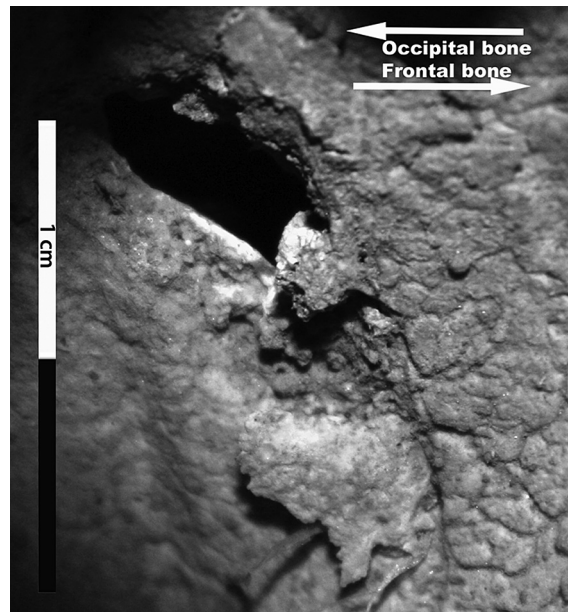


Abbildung 28: Fraktur auf der Schädellinnenseite des Schädelfundes aus Messina, "margins of the perforation on the endocranial surface."; [Messina et al. 2013]

cher bzw. plastischer Verformung identifiziert (siehe Abbildung 28 und im Anhang 35). Da beide Schädel menschlich sind, eine Fraktur in der gleichen Knochenstruktur aufweisen und ähnliche Todesursachen vermutet werden, sind die Ergebnisse besser vergleichbar, als mit den untersuchten Schweineschädeln von Jordana et.al. . Allerdings müssten noch mehr Schädel mit Pfeilwunden untersucht werden, um herauszufinden, ob die beobachteten Morphologien typische Anzeichen für perimortem Pfeilverletzungen sind.

Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, gelten aber schräge, abgeplatzte Bruchkanten auf der Schädellinnenseite und plastische Verformungen als Anzeichen für Krafteinwirkung mit hoher Geschwindigkeit. Beides ist sowohl beim Schädel von Messina, als auch beim Görzig-Schädel zu beobachten.

Weitere beim Görzig-Schädel vorhandene Anzeichen für eine perimortem Verletzung sind die scharfen, dunkel verfärbten Bruchkanten (wobei letzteres Merkmal wie oben stehend beschrieben auch nach der Ausgrabung eingetreten sein könnte).

Auch wenn keine Versuche mit Pfeilspitze und Beschuss-Test durchgeführt wurden, gibt es in Bezug darauf wichtige Erkenntnisse:

Die im Grab gefundene Bronzespitze kommt aufgrund der Auffindesituation als Ursache der Fraktur in Frage. Allerdings zeigt der Vergleich mit den Maßen der Spitze und den Maßen der Fraktur, dass es eher unwahrscheinlich ist, dass diese Spitze das Loch verursacht hat. Sie ist im Durchmesser zu groß und die Form eines durch so eine Spitze verursachten

Loches wäre eher dreieckig bzw. länglich oval.

Es wurde jedoch im Vergleich deutlich, dass die Fraktur des Görzig-Schädels Gemeinsamkeiten mit anderen, durch Projektilen mit hoher Geschwindigkeit verursachten, Frakturen besitzt. Daher könnte die Ursache auch die Einwirkung einer anderen, nicht aufgefundenen, Pfeilspitze sein. Auch aus der Völkerwanderungszeit sind einfache, nadelförmige Pfeilspitzen ohne Flügel oder Widerhaken (Bodkin-Spitzen) bekannt, die in Form und Durchmesser ein Loch wie das im Görzig-Schädel verursachen könnten.

Zu Anfang dieser Arbeit wurde überlegt, ob durch die Morphologie einer durch einen Pfeil verursachte Fraktur auf den verwendeten Bogen (Langbogen oder Kompositbogen) und damit vielleicht auch auf die Herkunft des Schützen geschlossen werden könnte.

Da wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben die Effizienz eines Bogens, und damit die kinetische Energie und Momentum eines Pfeils nicht nur durch die Zusammenstellung von einzelnen Komponenten und Bogendesign bedingt wird, sondern durch unzählige weitere Faktoren, wie zum Beispiel die Qualität des Bogenholzes, Abnutzung der Komponenten oder Luftfeuchtigkeit, gibt es theoretisch unendlich viele Bogen-Pfeil-Systeme, die die gleiche Effizienz besitzen und einen Pfeil auf gleiche Weise beschleunigen können. Es können auch zwei scheinbar gleiche Systeme unterschiedlich effizient sein. Es ist daher nicht möglich, exakt vorherzusagen, wie sich ein Pfeilschuss auf ein Ziel auswirken wird. Umgekehrt ist es auch nicht möglich, von der Auswirkung eines Schusses auf den verwendeten Bogen zu schließen. [Ashby 2005]

Für den Vergleich von Belastungstest und Bogenschuss muss der zu verwendende Bogen daher basierend auf anderen Kriterien, wie Verwendungszweck und kulturelle Einordnung, ausgewählt werden.

4.2 Fazit und Ausblick

Durch die sehr kleine Testgruppe von nur zwei Schädeln, die vielen Einschränkungen, wie die künstliche Alterung durch Kochen in Waschmittellauge anstatt natürlicher Alterung im Erdboden, und ohne Originalwerkzeuge, sind die erlangten Ergebnisse nicht eindeutig und aussagekräftig genug, um die überprüfte Hypothese annehmen oder ablehnen zu können. Um zu aussagekräftigeren Ergebnissen zu kommen, müssten noch weitere Belastungstests angestellt werden.

Die in dieser Arbeit angestellten Experimente sollten daher erneut mit Replikaten der bei der Ausgrabung verwendeten Originalwerkzeuge durchgeführt werden. Um die Auswirkungen der Lagerung im Boden besser zu simulieren, könnten dafür Schweineschädel verwen-

det werden, die ebenfalls einige Monate in Löß-Boden gelagert wurden.

Für die Überprüfung der ursprünglich angestrebten Hypothese (Verursachung der Fraktur durch Pfeilschuss) wird ebenfalls ein Abguss der Originalspitze (bzw. einer in Form und zeitlicher Einordnung plausiblen Spitze) benötigt.

Für ein Experiment mit so einer Pfeilspitze sollten frische, unbehandelte Schädel mit Haut-und Fettgewebe verwendet werden. Da, wie in der Literatur ([Berryman et al. 1996], [Hubbard 1971], [Gilchrist et al. 2010], [Motherway et al. 2009]) erwähnt und in dieser Arbeit ebenfalls beobachtet, eine höhere Geschwindigkeit Einfluss auf die Auswirkung einer Krafteinwirkung hat, sollte für die Simulation eines Pfeilschusses ebenfalls eine realistische Geschwindigkeit von 60-90m/s angestrebt und die Ergebnisse mit Beschuss-Tests mit Pfeil und Bogen verglichen werden.

Anhang

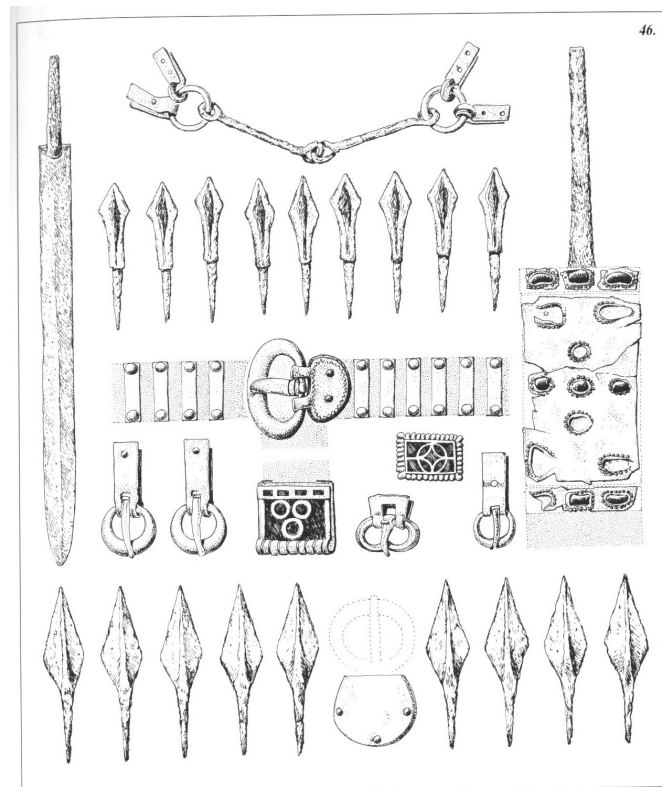


Abbildung 29: Inhalt eines Hunnengrabs; [Boña 1991]

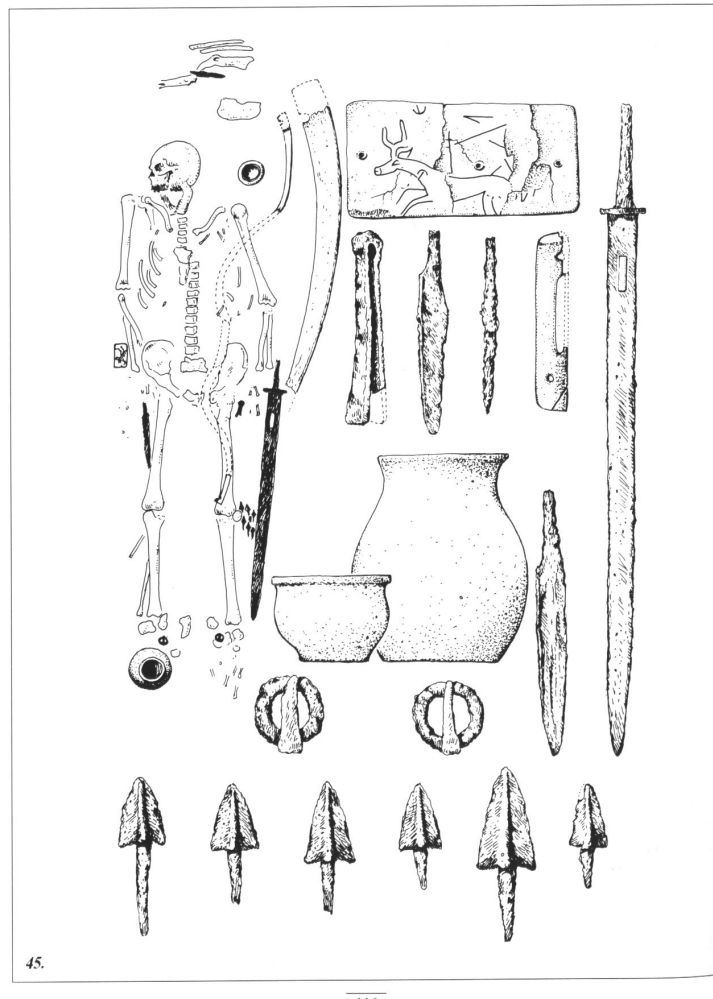


Abbildung 30: Inhalt eines Hunnengrabes; [Boña 1991]

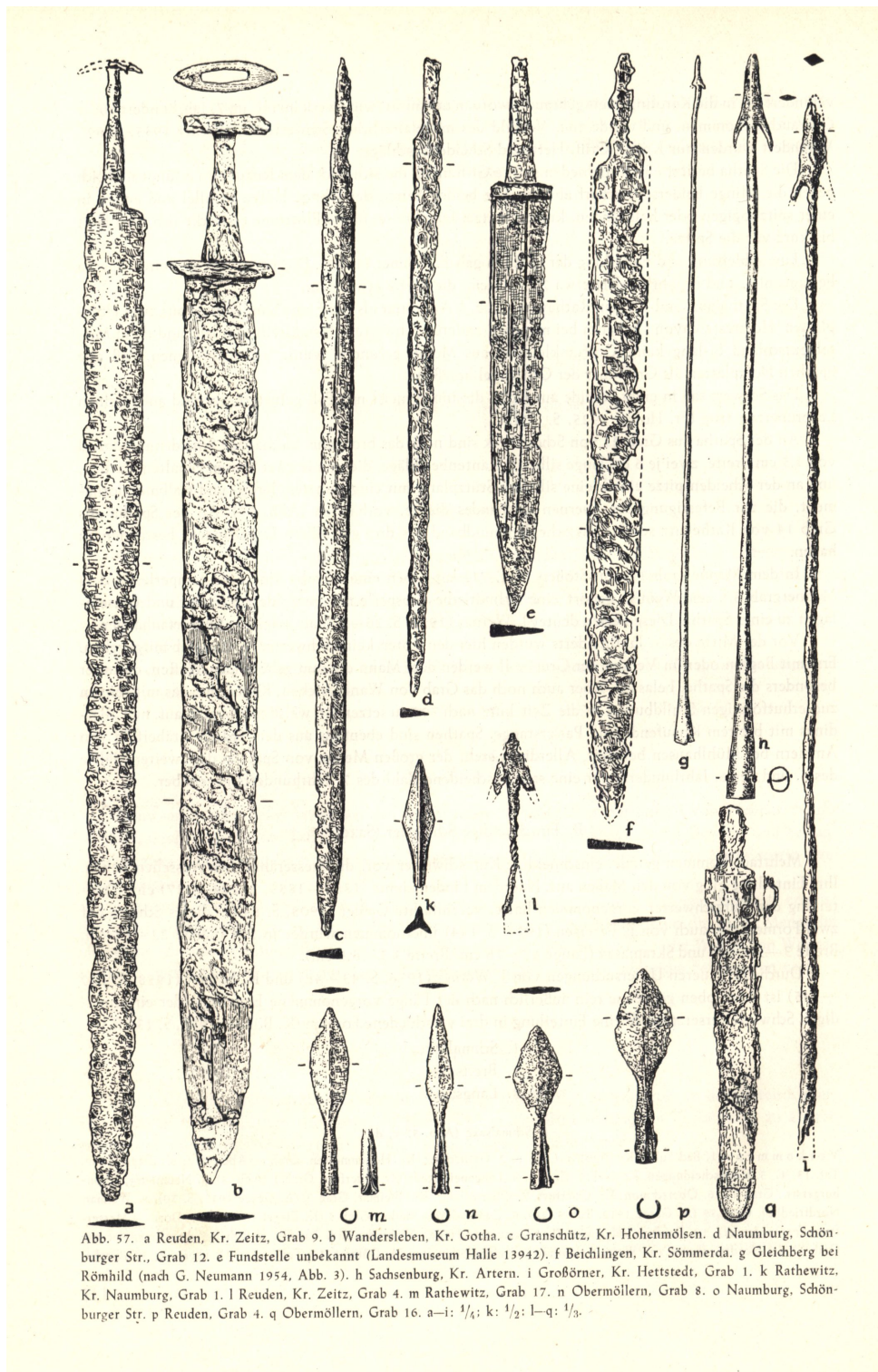
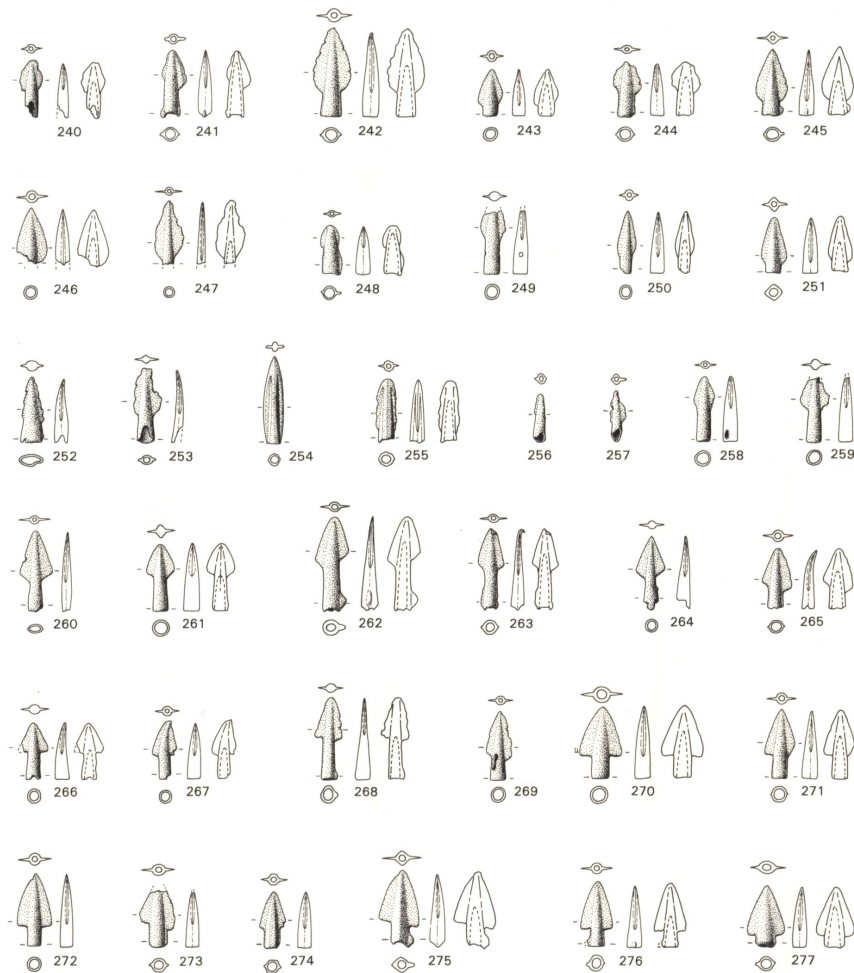


Abbildung 31: Verschiedene Waffen der Völkerwanderungszeit; [Schmidt 1961]



240. 244 Postoupky. – 241 Křenovice (?). – 242 Brno-Obřany, Brandgrab 138 (s. auch Taf. 38 A). – 243. 269 Klentnice, Höhensiedlung „Tabulová hora“. – 245. 246 Blučina, Höhensiedlung „Cezavy“. – 247. 265 Švábenice, Brandgrab 3. – 248. 254. 263 Štramberk, Höhensiedlung „Kotouč“. – 249 Držovice. – 250 Spytihněv, Depot (?). – 251 Mostkovice. – 252 Stařechev. – 253 Moravská Huzová. – 255. 260 Fundort unbekannt. – 256. 257 Rájec, Brandgrab 46. – 258 Malé Hradisko, Höhensiedlung „Staré Hradisko“. – 259 Určice, Brandgrab 173. – 261 Kostelec na Hané. – 262 Přítluky. – 264. 274 Hradisko, Depot. – 266. 267 Kobernice, Brandgrab 1 (s. auch Taf. 34, A). – 268 Vrchoslavice. – 270 Mostkovice. – 271 Skalce nad Svitavou, Siedlungsgrube 64. – 272 Smržice. – 273 Určice, Brandgrab 22. – 275 Skalce nad Svitavou, Siedlungsgrube 46. – 276 Blučina, Depot XV. – 277 Znojmo, Höhensiedlung „Hradiště“

M. 25

Abbildung 32: Verschiedene Art von Pfeilspitzen; [Říhový 1996]



Abbildung 33: Auswahl bronzener Tüllen-Pfeilspitzen aus dem Tollensetal; [Lidke et al. 2015]



Abbildung 44: Querschnitt durch den Einstich von Vergleichsschädel 2.2; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017

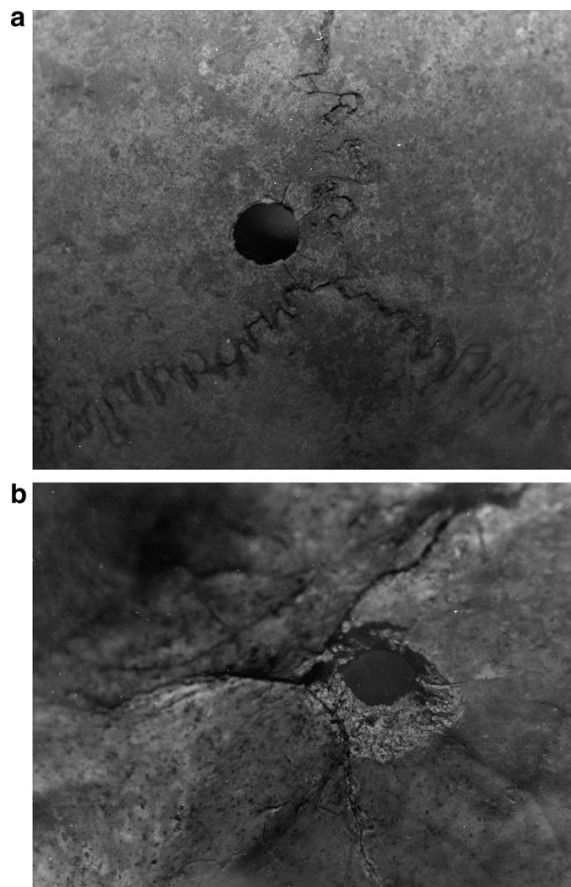


Abbildung 34: Eintrittswunde einer Kugel. "An 'execution style' entrance bullet wound to the posterior occiput showing internal bevelling (a and b)"; [Hollmann et al. 2008]

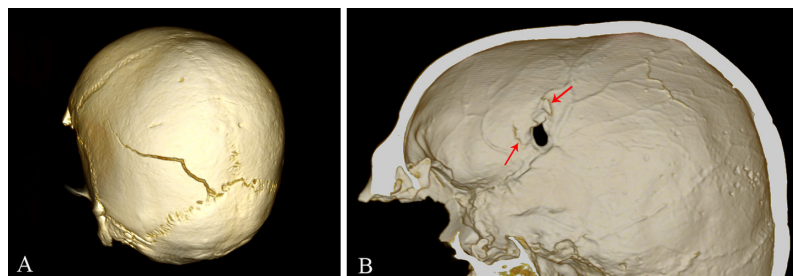


Abbildung 35: "3D CT reconstruction images depicting the plastic response and hinging (a); smooth preponderant texture and regular outline (b)."; 35



Abbildung 36: Fraktur des Görzig-Schädels auf extrakranieller Seite; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017

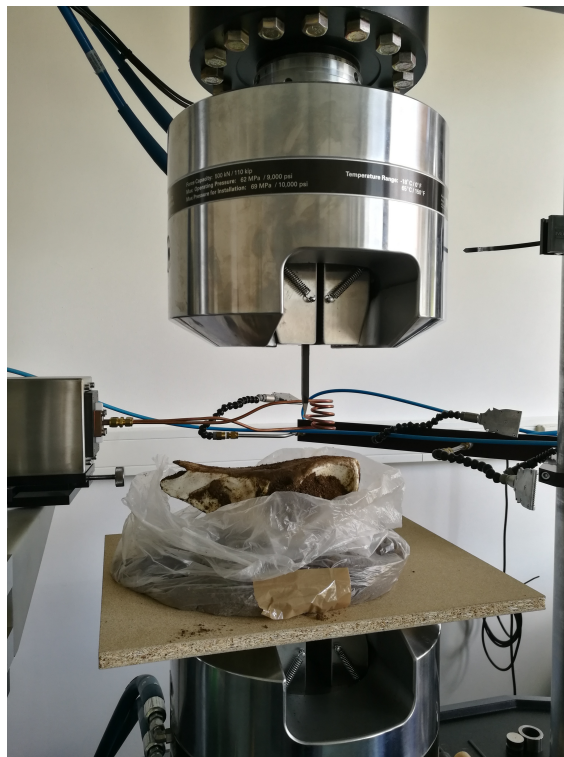


Abbildung 37: Vergleichs-Schädel 1 vor dem Versuch; eigene Grafik



Abbildung 38: Vergleichs-Schädel 1 nach dem Versuch; eigene Grafik



Abbildung 39: Vergleichs-Schädel 1 mit Fraktur; eigene Grafik



Abbildung 40: Vergleichs-Schädel 2 nach dem zweiten Versuch; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017



Abbildung 41: Querschnitt durch den Einstich von Vergleichsschädel 1; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017



Abbildung 42: Querschnitt durch den Einstich von Vergleichsschädel 2.1; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017

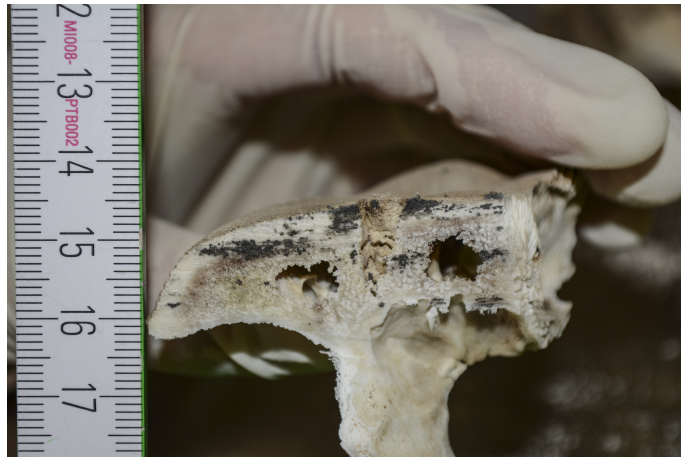


Abbildung 43: Querschnitt durch den Einstich von Vergleichsschädel 2.1; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017



Abbildung 45: Querschnitt durch den Einstich von Vergleichsschädel 2.2; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017

Abbildungsverzeichnis

1	Vollständiger Pfeil; eigene Grafik	8
2	Nocke; eigene Grafik	9
3	Schema eines einfachen Langbogens; eigene Grafik	11
4	verschiedene Bogendesigns; aus [Grayson et al. 2007]	12
5	verschiedene Bogendesigns; aus [Grayson et al. 2007]	13
6	Siyahs während des Ziehens; [Wikimedia-Commons 2006]	14
7	traditioneller asymmetrischer Reiterbogen; [reiterbogenshop.com 2017] . . .	15
8	verschiedene Griffarten nach Morse; [Morse 1885]	16
9	a) Pfeil eingenockt und Sehne auf Standhöhe. b) Pfeil eingenockt und Sehne ausgezogen; eigene Grafik	17
10	a) Pfeil wird durch die Seitwärtsbewegung der Sehne gekrümmt. b) Pfeil krümmt sich um den Bogen herum; eigene Grafik	17
11	Pfeil verlässt den Bogen und setzt Oszillation fort; eigene Grafik	18
12	Polpunkte eines oszillierenden Pfeils; eigene Grafik	18
13	Anatomie des flachen Knochens. "This cross-section of a flat bone shows the spongy bone (diploë) lined on either side by a layer of compact bone."; [Betts et al. 2017]	22
14	linke Seite des Görzig-Schädels; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017 . .	28
15	Fraktur auf intrakranieller Seite; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017 .	28
16	Pfeilspitze aus Grab 61; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017	29
17	"hunnisches oder hunnenzeitliches Kriegergrab" mit verschiedenen Pfeil- spitzen; [Bońa 1991]	30
18	Pfeilspitze Typ 249; Ausschnitt aus Anhang 32; [Říhovský 1996]	31
19	Pfeilspitzen aus der späten Völkerwanderungszeit; Ausschnitt aus Anhang 31; [Schmidt 1961]	31
20	verwendete Schnureisen; eigene Grafik	33

21	Vergleichs-Schädel 1 im Versuchsaufbau; eigene Grafik	36
22	Fraktur in Vergleichsschädel 1; eigene Grafik	37
23	Kraft-Weg-Kurve von Versuch 1	37
24	Fraktur in Vergleichsschädel 2, Versuch 1; Grafik von Marie-Luise Heuschel, 2017	38
25	Fraktur in Vergleichsschädel 2, Versuch 2; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017	39
26	Kraft-Weg-Kurve von Versuch 2.2	39
27	Fraktur auf der Schädelaußenseite des Schädelfundes aus Messina, "margins of the perforation on the ectocranial surface"; [Messina et al. 2013]	43
28	Fraktur auf der Schädelinnenseite des Schädelfundes aus Messina, "margins of the perforation on the endocranial surface."; [Messina et al. 2013]	44
29	Inhalt eines Hunnengrabs; [Boña 1991]	47
30	Inhalt eines Hunnengrabes; [Boña 1991]	48
31	Verschiedene Waffen der Völkerwanderungszeit; [Schmidt 1961]	49
32	Verschiedene Art von Pfeilspitzen; [Říhovský 1996]	50
33	Auswahl bronzener Tüllen-Pfeilspitzen aus dem Tollensetal; [Lidke et al. 2015]	51
44	Querschnitt durch den Einstich von Vergleichsschädel 2.2; Grafik von Marie- Luise Heuschkel, 2017	51
34	Eintrittswunde einer Kugel. "An 'execution style' entrance bullet wound to the posterior occiput showing internal bevelling (a and b)"; [Hollmann et al. 2008]	52
35	"3D CT reconstruction images depicting the plastic response and hinging (a); smooth preponderant texture and regular outline (b)."; 35	52
36	Fraktur des Görzig-Schädels auf extrakranieller Seite; Grafik von Marie- Luise Heuschkel, 2017	53
37	Vergleichs-Schädel 1 vor dem Versuch; eigene Grafik	53
38	Vergleichs-Schädel 1 nach dem Versuch; eigene Grafik	54
39	Vergleichs-Schädel 1 mit Fraktur; eigene Grafik	54
40	Vergleichs-Schädel 2 nach dem zweiten Versuch; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017	55

41	Querschnitt durch den Einstich von Vergleichsschädel 1; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017	55
42	Querschnitt durch den Einstich von Vergleichsschädel 2.1; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017	55
43	Querschnitt durch den Einstich von Vergleichsschädel 2.1; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017	56
45	Querschnitt durch den Einstich von Vergleichsschädel 2.2; Grafik von Marie-Luise Heuschkel, 2017	56

Literatur

- Altheim, Franz and Hans W. Haussig (1958). *Die Hunnen in Osteuropa*. Grimm Verlag.
- Ascenzi, A. and G. H. Bell (1972). “Chapter 9 - Bone as a Mechanical Engineering Problem”. In: *The Biology and Physiology of Bone*. Ed. by Geoffrey H. Bourne. Academic Press, pp. 311–352.
- Ashby, Ed (2005). *Momentum, Kinetic Energy, and Arrow Penetration (And What They Mean for the Bowhunter)*. letzter Zugriff am 08.08.2017, 03:50. URL: http://www.tuffhead.com/ashby_pdfs/ashby%5C%20ours/PDF%5C%20Momentum,%5C%20Kinetic%5C%20Energy%5C%20and%5C%20Arrow%5C%20Penetration.pdf.
- Bakas, Spyros (2014). In: *The Shooting Methods of Traditional Archery*. Erschienen zum WTAF International Academic Seminar 2014.
- Berg, Martina (2017). *Der Pfeil - Aufbau und Komponenten*. URL: <http://deutscher-bogensportverlag.de/der-pfeil-aufbau-und-komponenten/>.
- Berryman, Hugh E. and Susan Jones Haun (1996). “Applying Forensic Techniques to Interpret Cranial Fracture Patterns in an Archaeological Specimen”. In: *International Journal of Osteoarchaeology* 6, pp. 2–9.
- Betts, J. et al. (2017). *Anatomy and Physiology*. OpenStax College, Rice University. URL: <https://cnx.org/contents/14fb4ad7-39a1-4eee-ab6e-3ef2482e3e22%5C@8.103>.
- Boňa, István (1991). *Das Hunnenreich*. Konrad Theiss Verlag.
- Bow-International (2013). *The Archer’s Paradox and modern bows*. URL: <http://www.bow-international.com/features/traditional/the-archers-paradox-and-modern-bows/>.
- Bücker, Joseph (1992). *Anatomie und Physiologie: Lehrbuch für ärztliches Hilfspersonal*. Georg Thieme Verlag.
- Carey, Michael E. et al. (1989). “Experimental missile wound to the brain”. In: *Journal of Neurosurgery* 71.5, pp. 754–764.
- Collins, M. J. et al. (2002). “The survival of organic matter in bone: a review”. In: *Archeometry* 3, pp. 383–394.

- Currey, John D. (2013). *Bones. Structure and Mechanics*. Princeton University Press. URL: <https://www.degruyter.com/view/product/452572>.
- Gilchrist, M.D et al. (2010). “The Mechanical Properties of Cranial Bone”. In: *Lim C.T., Goh J.C.H. (eds) 6th World Congress of Biomechanics (WCB 2010)* August 1-6, pp. 776–779.
- Grayson, Charles E., Mary French, and Michael J. O’Brian (2007). *Traditional Archery from Six Continents: the Charles E. Grayson Collection*. University of Missouri Press.
- Grupe, Gisela (1995). “Preservation of Collagen in Bone From Dry, Sandy Soil”. In: *Journal of Archaeological Science* 22, pp. 193–199.
- Hollmann, Tanja, Roger W. Byard, and Michael Tsokos (2008). “The processing of skeletonized human remains found in Berlin, Germany”. In: *Journal of Forensic and Legal Medicine* 15, pp. 420–425.
- Hubbard, Robert P. (1971). “Flexure of layered cranial bone”. In: *Journal of Biomechanics* 4, pp. 251–263.
- Huck, Thomas (2007). “Thüringen und Hunnen”. In: *Attila und die Hunnen*, pp. 323–336.
- Huelsing, Mark (2014). *What is arrow spine?* URL: <https://www.bowhunting.com/bowhunt101/arrow-spine/>.
- Jordana, Fabienne, Jacques Colat-Parros, and Michel Bénézech (2013). “Diagnosis of Skull Fractures According to Postmortem Interval: An Experimental Approach in a Porcine Model”. In: *Journal of Forensic Science* 58.
- Junkmanns, Jürgen (2013). *Pfeil und Bogen von der Altsteinzeit zum Mittelalter*. Hörnig Verlag.
- Kleinecke, Johanna (2011). “Das Gräberfeld Görzig, Kr. Köthen - eine archäologische und anthropologische Untersuchung”.
- Kooi, B. W. (1983). “On the mechanics of the bow and arrow”. PhD thesis.
- Lidke, Gundula, Thomas Therberger, and Detlef Jantzen (2015). “Das bronzezeitliche Schlachtfeld im Tollensetal - Krieg, Fehde oder Elitenkonflikt?” In: *Krieg - eine archäologische Spurensuche*. Erschienen im Begleitband zur Sonderausstellung in Halle/S., pp. 337–346.
- Lovell, Nancy C. (1997). “Trauma Analysis in Paleopathology”. In: *Yearbook of Physical Anthropology* 40, pp. 139–170.
- Manley, Geoffrey T. et al. (2006). “Controlled cortical impact in swine: pathophysiology and biomechanics”. In: *Journal of Neurotrauma* 23.2, pp. 128–139.

- McElhaney, James H. et al. (1970). "Mechanical Properties of cranial bone". In: *Journal of Biomechanics* 3, pp. 495–511.
- Messina, Andrea Dario et al. (2013). "Fatal cranial injury in an individual from Messina (Sicily) during the times of the Roman Empire". In: *Journal of Forensic and Legal Medicine* 20, pp. 1018–1023.
- Meyer, H. O. (2015). "Applications of physics to archery".
- Morse, Edward S. (1885). "Ancient and Modern Methods of Arrow-Release". In: *Bulletin of the Essex Institute* 17. Webseite zuletzt besucht am 29.07.2017, 00:31 Uhr. URL: <http://www.archive.org/details/cu31924029871823>.
- Motherway, Julie A. et al. (2009). "The mechanical properties of cranial bone: The effect of loading rate and cranial sampling position". In: *Journal of Biomechanics* 42, pp. 2129–2135.
- Nagaoka, Tohomito (2012). "Cranial Traumatic Injuries Caused by Weapons in Tokugawa, Japan". In: *International Journal of Osteoarchaeology* 22, pp. 138–144.
- Norman, T. L., S. V. Nivargikar, and D. B. Burr (1996). "Resistance to crack growth in human cortical bone is greater in shear than in tension". In: *Journal of Biomechanics* 8, pp. 1023–1031.
- Pope, Ian (2011). *Modern Longbow Design and Toxophilus*. Lulu.
- Pritchard, J.J. (1972). "Chapter 1 - General Histology of Bone". In: *The Biology and Physiology of Bone*. Ed. by Geoffrey H. Bourne. Academic Press, pp. 1–20.
- Raymond, David E. and Cynthia A. Bir (2015). "A Biomechanical Evaluation of Skull-Brain Surrogates to Blunt High-Rate Impacts to Postmordem Human Subjects". In: *Journal of Forensic Sciences* 60.2, pp. 1556–4029.
- reiterbogenshop.com (2017). letzter Zugriff am 07.08.2017, 16:16. URL: <http://www.recurvebowshop.com/asymmetric+hun+bow+deer+szarvas+from+Kassai.htm>.
- Říhovský, Jiří (1996). *Die Lanzen-, Speer- und Pfeilspitzen in Mähren*. Steiner.
- Robbins, D. H. and J. L. Wood (1969). "Determination of mechanical properties of the bones of the skull". In: *Experimental Mechanics* 9.5, pp. 236–240.
- Roberts, Jack C. et al. (2013). "Development of a human cranial bone surrogate for impact studies". In: *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 1, p. 13.
- Schmidt, B. (1961). *Die späte Völkerwanderungszeit in Mitteldeutschland*. Max Niemeyer Verlag.
- Sigler-Eisenberg, Brenda (1985). "Expanding the Concept of Applied Archaeology". In: *American Antiquity* 50.3, pp. 650–655.

- Spinks, J. L. (2007). *Understanding Arrow Penetration*. letzter Zugriff am 07.08.2017, 20:35. URL: <http://www.grizzlystik.com/PR/UnderstandingArrowPenetration.pdf>.
- Torimitsu, Suguru et al. (2013). “Statistical analysis of biomechanical properties of the adult skull and age-related structural changes by sex in a Japanese forensic sample”. In: *Forensic Science International* 234, 185.e1–185.e9.
- Turner-Walker, G. and T.V. Parry (1995). “The Tensile Strenght of Archaeological Bone”. In: *Journal of Archaeological Science* 22, pp. 185–191.
- Vashishth, D., J. C. Behiri, and W. Bonfield (1997). “Crack growth resistance in cortical bone: concept of microcrack toughening”. In: *Journal of Biomechanics* 8, pp. 763–769.
- Villa, Paola and Eric Mahieu (1991). “Breakage patterns of human long bones”. In: *Journal of Human Evolution* 21, pp. 27–48.
- Wang, X. and S. Puram (2004). “The toughness of cortical bone and its relationship with age”. In: *Annals of Biomedical Engineering* 32, pp. 123–135.
- Wikimedia-Commons (2006). *Function of an Asiatic Siyah (Bowtip), leverage is red*. letzter Zugriff am 04.08.2017 um 18:43. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Siyah.jpg>.
- Wood, Jack L. (1971). “Dynamic response of human cranial bone”. In: *Journal of Biomechanics* 4, pp. 1–12.
- Xiong, Ye, Asim Mahmood, and Michael Chopp (2013). “Animal models of traumatic brain injury”. In: *Nature reviews Neuroscience* 14.2, pp. 128–142.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Leipzig, 18.09.2017

Alexandra Conradi